

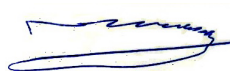
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет Електроніки

Кафедра Акустичних та Мультимедійних Електронних Систем

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри



Найда С.А.

(ініціали, прізвище)

“05” Червня 2020 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

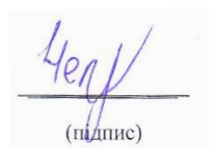
зі спеціальності (спеціалізації) 171 Електроніка

на тему: Акустичне проектування зали Вченої Ради КПІ ім. Ігоря Сікорського

Виконав: студент 4 курсу, групи ДГ-г61-1

Чепіль Олексій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Керівник асистент Котвицький І. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Консультант _____

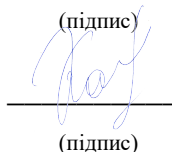
(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент м.н.с. відділу БФЕ ДП НДІБК, к.т.н. Котенко С.Г

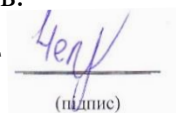
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)



(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент



(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет

Електроніки

(повна назва)

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

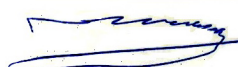
Спеціальність (спеціалізація)

171 «Електроніка»

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри



Найда С.А.

(ініціали, прізвище)

“05” Червня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект (роботу) студенту

Чепілю Олексію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Акустичне проектування зали Вченої Ради КПІ ім. Ігоря Сікорського»

керівник проекту (роботи) Котвіцький Ігор Валерійович, асистент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. №1196-с

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 05 червня 2020 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи): розбірливість мови (у відсотках артикуляції);
стандарний час реверберації; середній коефіцієнт поглинання; рівень прямого звуку
при передачі мови

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): провести огляд літератури; розрахувати акустичні характеристики наявного приміщення; обґрунтувати неприйнятність наявних акустичних характеристик; внести пропозиції для покращення акустичних характеристик приміщення; розрахувати систему озвучування для даного приміщення; представити акустичний проект приміщення; підвести підсумки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) план приміщення; графіки стандартного часу реверберації; ілюстрації побудови площадок відбиттів; побудова структури відбиттів; приклади розташування систем озвучування приміщення

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

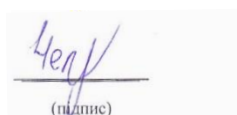
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01 квітня 2020 р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Збір джерел інформації для написання дипломної роботи	01.04.20 – 24.04.20	Виконано
2	Підготовка та написання 1 розділу	25.04.20 – 05.05.20	Виконано
3	Підготовка та написання 2 розділу	06.05.20 – 16.05.20	Виконано
4	Підготовка та написання 3 розділу	17.05.20 – 27.05.20	Виконано
5	Написання анотації, висновків, оформлення додатків	27.05.20 – 01.06.20	Виконано
6	Оформлення дипломної роботи	02.06.20 – 04.06.20	Виконано
7	Здача дипломної роботи	05.06.20	Виконано

Студент



(підпис)

О.В. Чепіль
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)



І.В. Котвицький

РЕФЕРАТ

Акустичне проектування зали Вченої Ради // Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр» Чепіль О.В. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», факультет електроніки, кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем, група ДГ-г-61-1. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.

Сторінок - 69, рисунків - 41, таблиць – 6.

Метою даної роботи є представлення плану заходів щодо покращення акустичного середовища зали Вченої Ради.

Ця робота містить в собі основні теоретичні викладки архітектурної акустики та практичне дослідження акустичних характеристик приміщення.

В ході виконання дипломної роботи були проведені розрахунки існуючих акустичних характеристик приміщення, пошук оптимальних характеристик, наведені пропозиції щодо покращення акустичного середовища, були проведені розрахунки системи озвучування та підбір апаратури.

Ключові слова: час реверберації, звукопоглинання, розбірливість мови, рівень звуку, акустичний проект.

ABSTRACT

Acoustic Design of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Assembly Hall // Thesis for a higher education "Bachelor". Chepil O.V. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Faculty of Electronics, Department of Acoustic and Multimedia Electronic System, group DG-g61-1. – K: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020.

Pages – 69, figures – 41, tables – 6.

The purpose of this work is representation of an action plan aimed to improve Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Assembly Hall acoustic environment.

This work contains general theoretic information about architecture acoustics and practical research of assembly hall's acoustic parameters.

The course of the work includes calculation of current acoustic parameters, research of optimal acoustic parameters, suggestions for improving acoustic environment, calculations of sound system and equipment selection.

Key words: reverberation time, sound absorption, language intelligibility, sound level, acoustic design.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ АРХІТЕКТУРНОЇ АКУСТИКИ.....	9
1.1 Поширення звуку в приміщенні. Методи дослідження звукового поля.....	9
1.1.1 Статистична теорія реверберації.....	9
1.1.2 Характеристики звукового поля в приміщенні.....	10
1.1.3 Стандартний час реверберації.....	13
1.1.4 Акустичне відношення.....	15
1.1.5 Оптимальний час реверберації.....	16
1.1.6 Геометричний метод.....	19
1.1.7 Площини перших відбиттів звукового поля.....	20
1.1.8 Площини других відбиттів звукового поля.....	22
1.1.9 Аналіз часової послідовності відбиттів.....	24
1.2 Звукоізоляція приміщень.....	26
1.3 Озвучування та звукопідсилення.....	27
1.3.1 Вимоги до систем звукопідсилення приміщень.....	28
1.3.2 Класифікація систем озвучування.....	30
1.3.3 Критерії розбірливості.....	32
1.3.4 Основні тези проектування систем звукопідсилення.....	33
Висновки до розділу.....	34
РОЗДІЛ 2. АКУСТИЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАЛИ ВЧЕНОЇ РАДИ.....	36
2.1 Параметри приміщення зали Вченої Ради.....	36
2.2 Визначення оптимуму реверберації.....	38
2.3 Розрахунок загального поглинання.....	38
2.4 Побудова площин перших та других відбиттів.....	41
2.5 Розрахунок часової послідовності відбиттів.....	42
2.6 Розрахунок звукоізоляції приміщення.....	42
Висновки до розділу.....	44
РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОЗВУЧУВАННЯ.....	45
3.1 Геометрія розміщення гучномовців.....	45

3.2 Вибір акустичної системи.....	46
3.3 Розрахунок звукового поля.....	48
3.4 Розрахунок критеріїв розбірливості.....	50
3.5 Підбір апаратури.....	51
Висновки до розділу.....	56
ВИСНОВКИ.....	57
ДОДАТКИ.....	58
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	68

ВСТУП

Зала Вченої Ради Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського являє собою історичне приміщення, вік якого співставляється з віком самого інституту. Протягом усієї її історії тут відбувалися різноманітні заходи, збори та зібрання головних діячів університету. З роками Київський політехнічний інститут істотно змінювався, будувалися нові корпуси, змінювалася структура навчального закладу та його лідери. Але в залі Вченої Ради і по цей день продовжується проведення заходів, в яких приймає участь уся еліта університету. Тому питання акустичного комфорту в даному приміщенні постає надзвичайно гостро.

При проектуванні даного приміщення, а це мало місце більше ста років тому, мова про створення комфортних акустичних характеристик не йшла. В ті часи така наука, як архітектурна акустика лише була на стадії зародження. Протягом років робота зі створення оптимальної акустичної обстановки не відбувалася. Тим не менш, із суб'єктивних вражень слухачів давно відомо, що дане приміщення потребує істотного вдосконалення з точки зору акустичного комфорту.

Оскільки зала Вченої Ради призначена для проведення в основному повних програм, головне завдання акустичного проектування – домогтися максимальної розбірливості мови. Саме ж акустичне проектування передбачає дослідження уже існуючих акустичних характеристик приміщення, їх удосконалення шляхом внесення звукопоглинаючих матеріалів, проектування системи озвучування приміщення.

Результатом дипломної роботи є представлення акустичного проекту зали Вченої Ради з описанням робіт, які необхідні для створення акустичного комфорту в приміщенні.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВИ АРХІТЕКТУРНОЇ АКУСТИКИ

1.1 Поширення звуку в приміщенні. Методи дослідження звукового поля.

Внаслідок розвитку архітектурної акустики як науки сформувалося три методи дослідження звукового поля в приміщенні – статичний, геометричний та хвильовий.

Статистичний метод описання звукових полів оперує середніми значеннями густини звукової енергії в приміщенні і не претендує на визначення тисків і коливальних швидкостей в окремих його точках [2].

Геометрична акустика має багато спільних рис з геометричною оптикою. Вважається, що закони відбиття звуку аналогічні законам в геометричній оптиці. Основою досліджень в геометричній акустиці є побудова відбиттів звукових хвиль від поверхонь, завдяки яким можна побачити напрямок поширення звукової хвилі. За відомою швидкістю поширення звуку, ці побуди дозволяють визначити запізнення звукових променів і виявити недоліки тої чи іншої площадки відбиттів.

Хвильова теорія виходить з фізичних закономірностей звукових процесів, що протікають в приміщенні. Головний недолік даної теорії є складність математичного апарату, яка не дозволяє поки що одержати необхідні для акустичного проектування розрахункові формули. Методи хвильової акустики застосовують на практиці для приміщень малого об'єму правильної форми в низькочастотному діапазоні [2].

Отже, існуючі методи розрахунку звукових полів приміщень базуються на положеннях хвильової, статистичної і геометричної акустики. При вирішенні задач будівельно-акустичного проектування в більшості випадків користуються методами статистиної і геометричної теорії.

1.1.1. Статистична теорія реверберації

Статистична теорія реверберації була розроблена У. Себіном, Ф. Ейрінгом та їх послідовниками в XIX - XX ст. Дана теорія базується на моделі ідеального приіщення. В ідеальному приміщенні акустичне поле після припинення дії джерела звуку розраховується на основі статистичного опису процесу згасання звукових хвиль [2]. Це припущення означає, що відбиття звукового променя від тої чи іншої поверхні не

несе великі втрати на поглинання. Крім того, це означає, що в кожному об'ємі в будь-який момент часу приходить велика кількість відбиттів від оточуючих поверхонь.

Вищезгадані міркування дозволяють вважати, що середні значення потоку звукової енергії в різних напрямках однакові, тобто звукове поле ізотропне, і середня в часі густина звукової енергії в будь-якій точці об'єму може бути прийнята однаковою. Тобто звукове поле було названо дифузним [2].

Також, завдяки тому, що для звукового поля, утвореного великою кількістю відбиттів, можна нехтувати явищами інтерференції, при розрахунках можливо застосувати при метод енергетичного додавання, тобто в будь-якій точці об'єму додавати густини звукової енергії, що приносяться кожним відбитим сигналом.

Користуючись такою трактовкою задачі, У. Себін застосував статистичний метод дослідження, подібний до того, що використовується в кінематичній теорії газів, з застосуванням математичної теорії ймовірностей. Цей метод був покладений в основу теорії Себіна і його послідовників (Ейрінг, Кнудсен та інші). Теорія в подальшому одержала назву статистичної теорії реверберації.

1.1.2. Характеристики звукового поля в приміщенні.

Статистичне дослідження звукових полів у приміщеннях вимагає попереднього визначення середнього часу між двома послідовними відбиттями звуку від оточуючих поверхонь, так само як і середнього числа відбиттів, які зазнають звукові хвилі в одиницю часу [6].

Базуючись на принципах теорії ймовірності, можливо знайти ймовірність падіння звуку за час dt під будь-яким кутом і на будь-який елемент приміщення, а збільшуючи цей інтервал, ми одержимо такий проміжок часу τ , в межах якого падіння звуку на будь-яку точку поверхні S повинно відбутися обов'язково. Цей інтервал часу τ є середнім часом між двома послідовними відбиттями звуку або середнім часом вільного пробігу звукової хвилі і визначається співвідношенням:

$$\tau = \frac{4V}{c_0 S}, \quad (1.1)$$

де V - об'єм приміщення; S - сумарна площа поверхонь, що огорожують приміщення; c_0 - швидкість розповсюдження звуку в повітрі.

Середнє число відбиттів за одиницю часу

$$n = \frac{l}{\tau} = \frac{c_0 S}{4V}, \quad (1.2)$$

а середня довжина вільного пробігу звукової хвилі

$$l_0 = c_0 \tau = \frac{4V}{S}. \quad (1.3)$$

Іншою важливою характеристикою приміщення є середній коефіцієнт поглинання звуку. Коефіцієнтом поглинання матеріалу α називають відношення поглиненої енергії звукової хвилі $E_{\text{погл}}$ до енергії хвилі, падаючої на поверхню цього матеріалу $E_{\text{пад}}$

$$\alpha = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}}.$$

Коефіцієнти поглинання залежать від кута падіння звукової хвилі на поглинаючий матеріал. Розрізняють нормальний коефіцієнт поглинання (для кута падіння 90°) і дифузний (для будь-яких кутів падіння).

Якщо розглядати приміщення обмежене однорідною за своїми фізичними та геометричними властивостями поверхнею, то середній коефіцієнт α визначається як відношення енергії, поглиненої цією поверхнею, до енергії, падаючої на неї будь-якими кутами.

Добуток середнього коефіцієнта поглинання на поверхню S

$$A = \alpha S \quad (1.4)$$

прийнято називати загальним поглинанням приміщення або фондом поглинання. Одиниця вимірювання – Себін.

Якщо приміщення обмежене поверхнями S_1, S_2, \dots з коефіцієнтами $\alpha_1, \alpha_2, \dots$ (виміряними в умовах дифузного звукового поля), то загальне поглинання визначається сумою поглинань окремих ділянок поверхні:

$$A = \sum_i \alpha_i S_i. \quad (1.5)$$

При цьому середній коефіцієнт поглинання є

$$\alpha = \frac{A}{S} = \frac{I}{S} \sum_i \alpha_i S_i. \quad (1.6)$$

Уявлення про дифузне звукове поле в приміщеннях та зв'язане з ним уявлення про можливість використання статистичних величин середнього часу вільного пробігу хвилі τ та середнього коефіцієнту поглинання α дають можливість побудувати просту теорію нестационарних акустичних процесів в приміщеннях – швидкого наростання звукової енергії після увімкнення джерела звуку та поступового її зменшення після вимкнення джерела. Останній процес і являє собою явище відзвуку або реверберації [2, с. 160].

Відомо, що наростання звукової енергії в приміщенні після ввімкнення джерела звуку [1, стр. 81]

$$E(t) = \frac{4P_a V}{c_0 A} \left[1 - \exp \frac{c_0 S \ln(1 - \alpha)}{4V} t \right]. \quad (1.7)$$

Для наростання середньої густини енергії маємо звідси:

$$W(t) = \frac{E(t)}{V} = \frac{4P_a}{c_0 A} \left[1 - \exp \frac{c_0 S \ln(1 - \alpha)}{4V} t \right]. \quad (1.8)$$

Для стаціонарного режиму, коли втрати енергії, завдяки поглинанню компенсують енергію, що надається джерелом звуку, з (1.7) і (1.8) випливають формули

$$E_0 = \frac{4P_a V}{c_0 A}, \quad (1.9)$$

$$W_0 = \frac{4P_a}{c_0 A}. \quad (1.10)$$

Формули реверберації в приміщенні після вимкнення джерела [2, с 82]:

$$E(t) = E_0 \left[\exp \frac{c_0 S \ln(1 - \alpha)}{4V} t \right]; \quad W(t) = W_0 \left[\exp \frac{c_0 S \ln(1 - \alpha)}{4V} t \right]. \quad (1.11)$$

Графіки процесів наростання звуку і реверберації, побудовані за рівняннями (1.12), подані на (рис. 1.1, а). Тут зображений типовий хід цих процесів.

Зовсім іншу і більш характерну картину можна одержати, відклавши по осі ординат не саму густину W звукової енергії, а її логарифм. Вибір логарифмічної шкали пов'язаний з тією обставиною, що наш орган слуху оцінює інтенсивність

зовнішнього подразнення в логарифмічному масштабі, адекватно реагуючи на однакові відносні (а не абсолютні) змінення звукового тиску.

На (рис.1.1, б) відтворений графік тих самих нестаціонарних процесів, з тією різницею, що по осі ординат відкладений рівень звукової енергії (в дБ). При цьому спостерігається картина, яка характеризує слухове сприйняття нестаціонарних процесів в закритому приміщенні. Варто звернути увагу на суб'єктивну швидкоплинність процесу наростання рівня, завдяки чому це явище не відіграє суттєвої ролі в оцінці акустичної якості приміщення. Разом з тим абсолютно чітко спостерігається повільний процес спадання рівня, що подається у вигляді відрізка спадаючої прямої. Нахил цієї прямої по осі абсцис визначає швидкість спадання звуку в дБ/с. Формулу для швидкості спадання можна отримати з рівняння (1.11):

$$L = 10 \lg \frac{W}{W_0} = -\frac{c_0 S}{4V} \ln(1 - \alpha) t \cdot 10 \lg(e) = -\frac{4,34 c_0 S}{4V} \ln(1 - \alpha) t. \quad (1.12)$$



Рис. 1.1 Графіки процесів наростання звуку і відзвук в приміщенні
а – для густини енергії; б – для рівня звукової енергії [2, с. 83]

1.1.3. Стандартний час реверберації

Для використання часу реверберації як критерія оцінки акустичних умов в приміщенні була введена нормована величина – стандартний час реверберації, тобто час, впродовж якого звукова енергія зменшується в 10^6 разів. Це відповідає зниженню рівня енергії на $10 \lg 10^6 = 60$ дБ.

Для практичного обчислення часу реверберації користуються графіком для затухання рівня звукової енергії (рис. 1.2). Час реверберації може бути визначений за кутом нахилу прямої:

$$T = \frac{60}{\operatorname{tg}(\varphi)}. \quad (1.13)$$

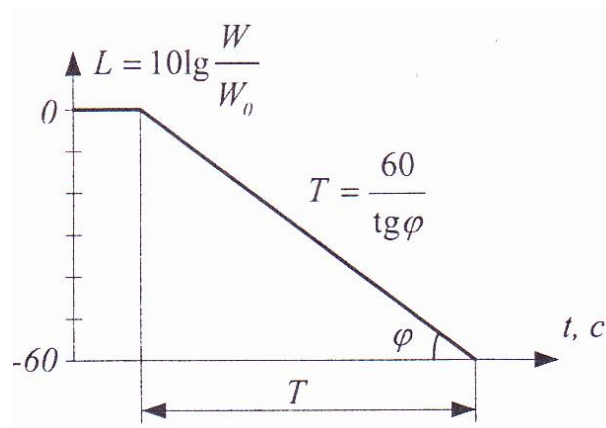


Рис. 1.2 Теоретична крива затухання звукової енергії у приміщенні і визначення часу реверберації [2, с. 84]

Якщо відзвук затухає за експоненціальним законом у відповідності з (1.11), то формулу для розрахунку стандартного часу реверберації можна отримати з виразу (1.12) за умови, що рівень джерела звуку L дорівнює 60 дБ. Підставивши $c_0 = 340$ м/с, одержимо формулу, відому під назвою формули Ейрінга:

$$T = \frac{0,164V}{-S \ln(1 - \alpha)}. \quad (1.14)$$

В приміщеннях з невеликим середнім коефіцієнтом поглинання ($\alpha < 0.2$) стандартний час реверберації розраховують за спрощеною формулою, відомою як формулою Себіна [2, с. 85]:

$$T = \frac{0,164V}{\alpha S} = \frac{0,164V}{A}. \quad (1.15)$$

Формула Ейрінга (1.14) є основною формулою для обчислення часу реверберації при акустичному проектуванні приміщення. Обчислення реверберації за цією формулою потребує знання середнього коефіцієнту поглинання α , який обчислюється для кожного приміщення за формулою (1.6). Коефіцієнти α_i , для різних видів

поверхонь (зокрема, для поверхонь, вкритих тими або іншими звукопоглинаючими матеріалами) визначені чисельними вимірюваннями, виконаними в спеціальних ревербераційних камерах і наводяться в довідниках.

Окрім стандартного часу реверберації існує також поняття еквівалентного часу реверберації, що розуміє під собою час реверберації, що відчувається на слух. Даний параметр залежить від акустичного відношення, мова про яке буде йтися далі.

1.1.4. Акустичне відношення

Попередні міркування призвели до уявлення про прямолінійний характер спадання рівня звукової енергії (рис. 1.1, б) в припущенні, що стаціонарне звукове поле в приміщенні є дифузним. Очевидно, що поблизу від джерела звуку стаціонарна густина $W_{\text{п}}$ енергії прямих звукових хвиль повинна складати значну частину від густини загальної енергії, що складається з енергії і «дифузно-перемішаного» звуку, утвореного в результаті деякої кількості відбиттів від обмежуючої приміщення поверхні:

$$W = W_{\text{п}} + W_{\text{д}}, \quad (1.16)$$

де $W_{\text{д}}$ – густина дифузної звукової енергії.

Відношення

$$N = \frac{W_{\text{д}}}{W_{\text{п}}}, \quad (1.17)$$

що характеризує ступінь дифузності звукового поля в даній точці, прийнято називати акустичним відношенням.

Якщо перейти до рівнів $L_{\text{д}}$ дифузної складової та $L_{\text{п}}$ прямого звуку, то їх різниця буде дорівнювати [3, с. 23]:

$$L_{\text{д}} - L_{\text{п}} = 10 \lg N = \Delta L_N. \quad (1.18)$$

Цю величину також називають акустичним відношенням.

Акустичне відношення є одним з кількісних показників акустики приміщення. Якщо його значення велике, то мова стає нерозбірливою, а музика, особливо при швидкому виконанні, перетворюється в какофонію. Якщо акустичне відношення менше одиниці, то музика звучить уривчасто, губиться плавність виконання. Мова

також звучить уривчасто, але якщо акустичне відношення більше 0,5, то розбірливість не знижується. Тому для мовних передач намагаються забезпечити акустичне відношення в межах 1 – 4, а для музичних програм в межах 2 – 10. Хоча, для деяких видів виконання (органна музика) це відношення допускається до 16 – 20.

1.1.5. Оптимальний час реверберації

Основна задача акустичного проектування приміщень будь-якого призначення – лекційних або концертних залів, оперних або драматичних театрів, радіостудій, студій звукозапису, глядацьких залів кінотеатрів і т.д. – полягає в забезпеченні оптимуму реверберації, тобто такої її тривалості, при якій мова звучить (при достатньому рівні гучності) абсолютно розбірливо, а звучання музики або співацького голосу дає найбільш естетичний ефект.

При більшому часу реверберації різниця рівнів густини енергії між складами слова буде більшою, відповідно мова буде розмитішою. Якщо цей час є занадто малий, а чіткість мови – занадто висока, буде присутня неприємна роздільність мови, внаслідок чого якість сприйняття залишиться низькою. При прослуховуванні музики великий час реверберації створює надлишкову лункість, а малий час – порушує мелодійність звучання.

Оскільки і великий, і малий час реверберації погано впливають на якість звучання, то має існувати якесь проміжне значення часу реверберації при якому сприйняття звучання буде найкращим. Такий час і називається оптимальним.

В приміщеннях, призначених для прослуховування мови, основне значення має її розбірливість. Слід зазначити, що чутність і розбірливість мови – це різні поняття. Мова може звучати дуже голосно і бути прекрасно чутна, але бути при цьому зовсім нерозбірливою (наприклад у залах вокзалів, аеропортів).

Відповідно до міжнародних стандартів, під розбірливістю розуміють ступінь, з яким мова може бути зрозумілою слухачам. При цьому оцінюють відсоток артикуляції $A\%$, тобто відсоток вірно зрозумілих фраз, слів, складів і фонем. Відповідно до цього розрізняють види розбірливості: фонемну, складову, словесну і фразову.

Найбільш показовою є складова розбірливості, за нею зазвичай і оцінюється приміщення. Практично, складова розбірливості у мовному приміщенні не повинна бути менша 80 відсотків.

Процес реверберації в приміщенні виявляється критичним для розбірливості мови, оскільки до слухача з усіх боків надходять відбиті сигнали зі схожою спектральною структурою та великим вмістом низькочастотних складових. Тому істинну роль у підвищенні розбірливості мови відіграє відношення прямого звуку до відбитого по всій площі слухацьких місць; чим вище рівень прямого звуку, тим вище відсоток розбірливості.

Більш складним є питання оптимізації для звучання мови. Вирішальною в оцінці якості різних залів є суб'єктивна експертиза, виконана фахівцями, на основі якої виконують остаточне акустичне налаштування залів.

Для вдалого акустичного проектування залів необхідне встановлення зв'язку між об'єктивно вимірюваними параметрами звукового поля і суб'єктивною оцінкою якості їх звучання. До найбільш розповсюдженіших суб'єктивних критеріїв оцінки приміщень відносяться: лункість або життєвість; повнота звуку; чіткість і ясність; інтимність; теплота; яскравість; просторовість; гучність; баланс; ансамбль; тембр, а також негативні фактори: луна, луна, що пурхає і завади (шуми).

Для високоякісного сприйняття мовних і музичних програм необхідно, щоб вони мали достатній рівень гучності. Але, внаслідок обмеженої акустичної потужності природних джерел звуку, густина звукової енергії в приміщенні зі збільшенням його об'єму стає все менше, що погіршує умови прослуховування.

Зменшення густини звукової енергії, яке відбувається разом зі збільшенням об'єму приміщення, можливо в деякій мірі компенсувати збільшенням часу реверберації. Але слід пам'ятати, що таке збільшення можливе лише в невеликих межах, які дозволяють зберегти необхідну чіткість сприйняття і не порушують звичного для людини уявлення про співвідношення між об'ємом залу і часом реверберації в ньому.

Для мовних приміщень, де основною є розбірливість мови, можна знайти залежність максимального значення відсотка артикуляції від часу реверберації при зміні об'єму приміщення (рис. 1.3).

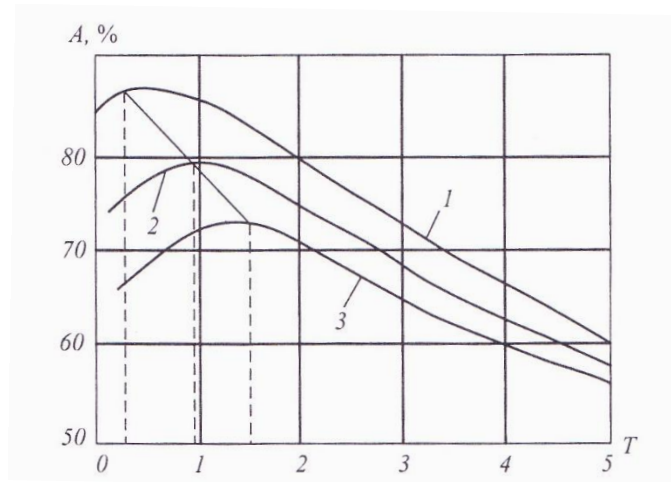


Рис. 1.3 Криві $A, \%$ при об'ємах приміщень 700 м^3 (1), 11200 м^3 (2), і 44800 м^3 (3). Пунктирні лінії вказують значення оптимального часу реверберації для цих об'ємів [2, с. 105]

Кожна крива на рис. 1.3 має явно виражений максимум, якому відповідає значення часу реверберації для приміщення даного об'єму.

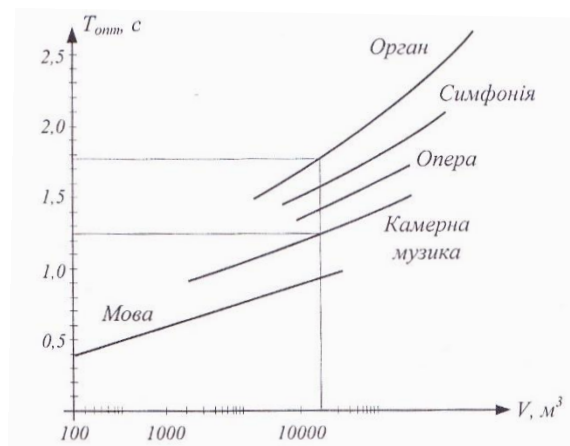


Рис. 1.4 Графік оптимальних значень часу реверберації в залежності від об'єму і призначення приміщення на частоті 500 Гц [2, с. 105]

На рис. 1.4 наведений графік оптимальних значень часу реверберації на частоті 500 Гц в залежності від об'єму приміщення.

Оптимум реверберації для музичних приміщень займають, як видно з графіка, досить широку смугу значень при заданому об'ємі приміщення. Природно, що різноманітність стилів музики вносить деяку невизначеність в задачу, розв'язувану проектувальником в тих випадках, коли зал призначається для прослуховування музики різного характеру. В таких випадках шукають компромісні рішення, які в певній мірі виправдовуються тим, що людське вухо не помічає відхилень від оптимуму порядку $\pm 10\%$.

Задача залежності часу реверберації від об'єму музичного приміщення вперше була розв'язана С. Я. Ліфшицем. Ним була виведена формула для оптимального часу реверберації:

$$T_{\text{опт}} = 0,41 \lg V. \quad (1.19)$$

З деякими уточненнями пропонується визначати оптимальний час реверберації в залежності від об'єму приміщення за такими наближеними формулами:

для мовних аудиторій $T_{\text{опт}} = 0,3 \lg V - 0,05$;

для приміщень оперних театрів $T_{\text{опт}} = 0,4 \lg V - 0,15$;

для симфонічної музики $T_{\text{опт}} = 0,5 \lg V - 0,3$;

для студій концертних $T_{\text{опт}} = 0,5 \lg V - 0,1$;

для студій малих музичних $T_{\text{опт}} = 0,45 \lg V - 0,3$;

для мовних студій $T_{\text{опт}} = 0,4 \lg V - 0,4$,

де V – об'єм приміщення в м^3 .

1.1.6. Геометричний метод

До початку нашого сторіччя головна увага приділялась проблемам форми і співвідношення розмірів приміщення. В основу аналізу було покладено вивчення звукових потоків – прямого і відбитих – від поверхонь, що огорожують приміщення, у вигляді променевої картини.

Нанесення на плані приміщення траєкторій звукових променів від джерела звуку до поверхонь приміщення і побудова картини відбитих променів дозволяє побачити рівномірність розподілу звукової енергії в приміщенні і обчислити час запізнення одного відбиття відносно іншого.

Такий спосіб аналізу звукового поля одержав назву геометричної акустики.

В геометричній акустиці використовують поняття фронт і звукові промені (лінії, перпендикулярні фронту хвилі у всіх його точках), які вказують напрямок поширення звукової хвилі. Вважається, що закони відбиття звуку аналогічні законам геометричної оптики. Як вже зазначалось, звукова енергія в даній точці складається із суми енергій хвилі, що приходить безпосередньо від джерела, і енергій відбитих хвиль.

Шлях звукового променя, багаторазово відбитого від граней прямокутного паралелепіпеда, може бути представлений в розгорнутому зображенні в двох або трьох проекціях на площині, паралельній граням паралелепіпеда. Така побудова картин поширення звукових променів називається променевим ескізом.

Геометричний метод безпосередньо пов'язаний з аналізом форми приміщення і її впливом на звукове поле. Побудова променевих ескізів дозволяє визначити ряд серйозних акустичних недоліків, пов'язаних з невдалою формою.

1.1.7. Площини перших відбиттів звукового поля

Розглянемо модель утворення звукового поля. Нехай маємо приміщення прямокутної форми, що джерело звуку в якому розташоване в площині торцевої стіни, що найбільше відповідає практичним випадкам. Враховуючи, що в більшості випадків глядачі сидять в кріслах, які знаходяться на підлозі, будемо розглядати звукове поле в площині підлоги.

Джерело випромінює короткий звуковий імпульс однакової сили в усіх напрямках.

Очевидно, що вся випромінювана звукова енергія буде поширюватися до зустрічі з поверхнями приміщення. При цьому частина її прийде одразу на площину, заповнену глядачами, у вигляді прямої енергії. Решта прийде на площину після одноразового, дворазового, ... , n – разових відбиттів від огорожень приміщення.

Оскільки прихід відбитої енергії на площину підлоги після одного або багатьох відбиттів залежить від того, на яку частину поверхні стін і стелі впала пряма звукова енергія, роль різних ділянок поверхонь приміщення нерівноцінна у формуванні

ревербераційного процесу. Різне розташування поглиначів звуку на поверхнях приміщення викликає різну структуру процесу реверберації.

При побудові траєкторій променів використовується поняття уявного джерела звуку. Уявимо собі ситуацію, коли джерело звуку (в точці S) і приймач (в точці D) знаходяться в напівпросторі, обмеженому плоскою поверхнею P (рис. 1.5). При цьому в точку D , крім прямої хвилі, що визначається променем SD , приходить також хвиля, відбита від площини P . Для побудови цієї другої траєкторії спочатку знаходять розташування уявного джерела, розміщуючи його в точці S' , симетричній точці S відносно площини P . Потім поєднують S' і D і знаходять перетин прямої $S'D$ з площиною P . Цю точку позначають D' і проводять ламану $SD'D$, яка і являє собою шукану траєкторію. Аналогічно для приймача в точці C . Відрізок $D'C'$ - геометричне місце точок, відбившись від яких, звуковий промінь впаде на відрізок DC . Описана процедура лежить в основі всіх наступних побудов.

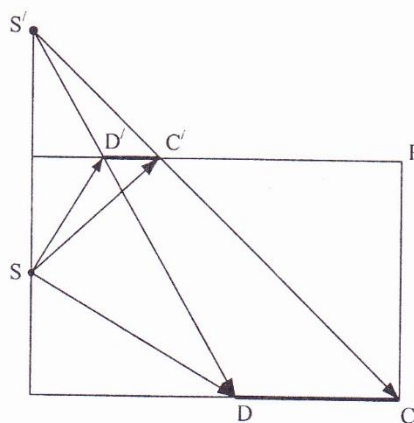


Рис. 1.5 Ілюстрація до побудови траєкторії звукового променя за допомогою уявного джерела звуку [2, с. 120]

При побудові площадки відбиття в аксонометрії (рис. 1.6) проводять граничні промені з уявного джерела S' , симетричного джерелу S відносно поверхні стелі, в кутові точки площі глядацьких місць (у нашому прикладі A, D, C, E). Сама площадка відбиттів являє собою перетин піраміди з вершиною S' , в основі якої лежить площа глядацьких місць, відбиваючою площиною (наприклад, площею стелі). Для побудови цього перетину необхідно за допомогою методів нарисної геометрії знайти точку перетину граничних променів з відбиваючою площиною і поєднати їх між собою. В

результаті отримаємо площадку $A_1D_1C_1E_1$. Аналогічно будуються площадки перших відбиттів на бокових і задній стіні.

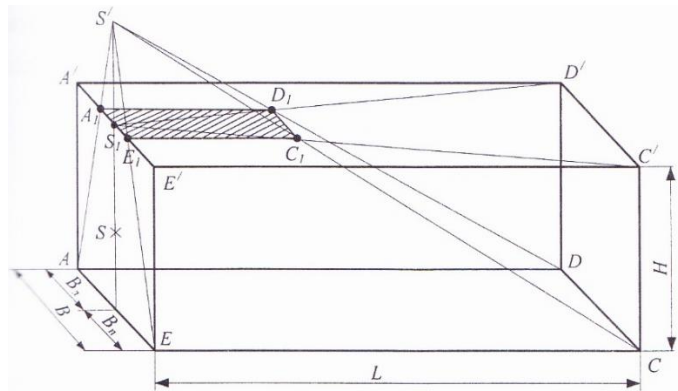


Рис. 1.6 Геометрична побудова для визначення площадки перших відбиттів $A_1E_1C_1D_1$ на стелі [2, с. 119]

1.1.8. Площини других відбиттів звукового поля

При побудові площадок других відбиттів спочатку намічають послідовність відбиттів (наприклад, стеля – задня стіна – глядачі). Потім знаходять положення первинного уявного джерела (симетрично дійсному джерелу відносно першої відбиваючої площини) і вторинного уявного джерела (симетрично первинному відносно другої відбиваючої площини). Ідея побудови ілюструється на рис. 1.7, а побудова в аксонометрії – на рис. 1.8 і 1.9.

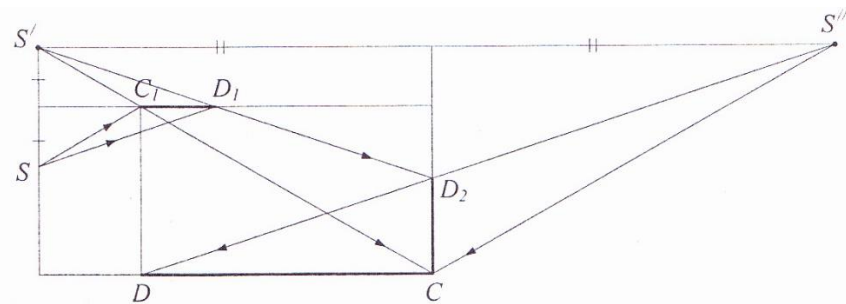


Рис. 1.7 Ілюстрація побудови площадок других відбиттів у плоскому перетині [2, с. 121]

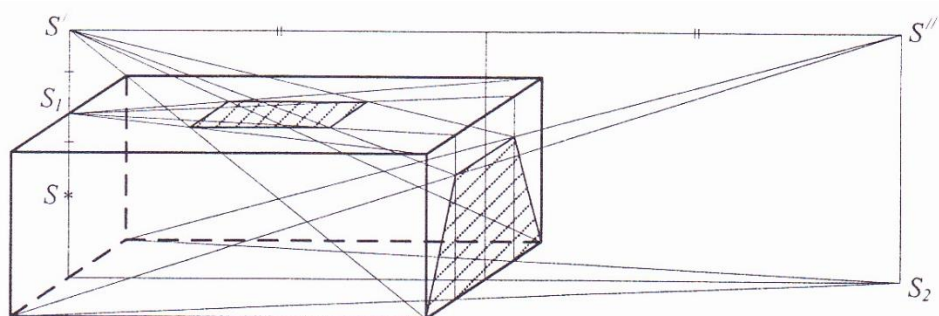


Рис. 1.8 Побудова площадок другого відбиття від стелі і задньої стіни [2, с. 122]

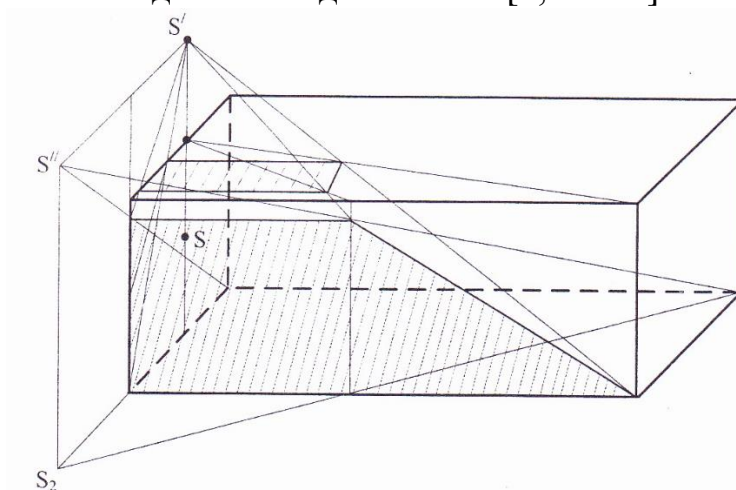


Рис. 1.9 Побудова площадок другого відбиття від стелі і бокової стіни [2, с. 122]

Аналізуючи графічний матеріал, можна зробити такі висновки.

Всі площадки, розташовані на стелі, повторюють форму підлоги, тобто мають вигляд прямокутників, розміри яких залежать від основних розмірів приміщення і висоти джерела звуку. Звукова енергія, відбита від стелі, як правило, надходить в будь-яку точку площини підлоги на початковій ділянці ревербераційного процесу. Розташування площадок відбиттів на стінах приміщення ділить його на дві частини. Границя між цими частинами проходить через центр джерела звуку.

Площадки відбиттів, розташовані на нижній частині стін, мають порівняно великі розміри тільки для першого і другого відбиттів. Таким чином, нижня частина стін виявляється в основному поверхнею, від якої звук приходить на площину глядацьких місць після одного і двох відбиттів, тобто ці відбиття, так само як і відбиття від стелі, формують початкову ділянку ревербераційного процесу.

На поверхні ж стін вище положення джерела звуку розташовані тільки площадки вищих відбиттів. Таким чином, верхня частина стін принципово є поверхнею, падаючи на яку звукова енергія приходить на площину глядацьких місць після багаторазових відбиттів, формуючих завершальну ділянку ревербераційного процесу.

Загальна кількість відбиттів, що приходять в будь-яку точку глядацьких місць, очевидно, визначається кількістю площадок відбиттів на поверхнях приміщення.

Кількість площадок перших відбиттів – 4, площадок других відбиттів – 9, третіх – 15 і т.д. Таким чином,

$$N|_{n=1}=4; \quad N|_{n \geq 2}=6n-3,$$

де n – номер відбиттів.

1.1.9. Аналіз часової послідовності відбиттів

Щоб уявити собі характер структури відбиттів у часі, що надходять у будь-яку точку глядацьких місць, потрібно виконати розрахунки довжини шляху і часу запізнення будь-якого n -го відбиття в порівнянні з прямим звуком.

На рис. 1.10 проілюстрована геометрична побудова розрахунку часу запізнення першого відбиття від стелі. Тут, за вісь абсцис x прийнята повздовжня вісь приміщення, а за вісь y – поперечна, точка O – точка перетину обох осей з вертикальною віссю z , що проходить через джерело звуку S .

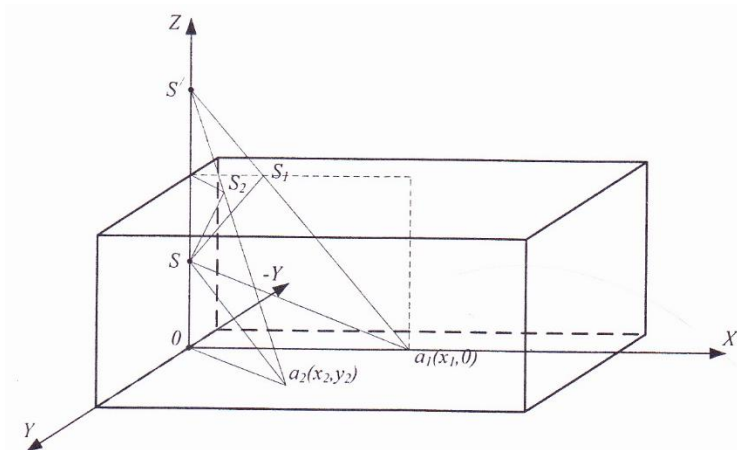


Рис. 1.10 Геометрична побудова для розрахунку часу запізнення першого відбиття від стелі [2, с. 124]

Різниця шляхів відбитого і прямого промнів в загальному вигляді [2, с. 125]:

$$\Delta r = \sqrt{(2H - Z_S)^2 + X_C^2 + Y_C^2} - \sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_S^2}, \quad (1.20)$$

де X_C, Y_C – координати слухача, Z_S – координата джерела, H – висота приміщення.

Якщо X_C, Y_C, H, Z_S виразити в метрах, а час – в мілісекундах, то запізнення відбитого звуку по відношенню до прямого буде:

$$\Delta t = \frac{\Delta r}{c_0} = \frac{1}{c_0} \left(\sqrt{(2H - Z_S)^2 + X_C^2 + Y_C^2} - \sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_S^2} \right). \quad (1.21)$$

Якщо джерело випромінює сферичну хвилю, то різниця рівнів звукової енергії між n -м відбиттям і прямою енергією може бути визначена як

$$\Delta L = L_n - L_0 = 20 \lg \frac{r_0}{r_n} + \sum_{i=1}^n 10 \lg(1 - \alpha_i), \quad (1.23)$$

де r_0 – довжина прямого звуку; r_n – довжина шляху n -го відбиття; α_i – коефіцієнти звукопоглинання матеріалів тих ділянок, від яких відбивається промінь.

На рис. 1.11 наведена побудова, виконана на основі розрахунку запізнень всіх відбиттів (до п'ятого включно) для приміщення розміром $20 \times 20 \times 10$ [м³] при розташуванні джерела звуку на висоті 2 м, а слухача в місці з координатами $X_C=10$ м, $Y_C=5$ м.

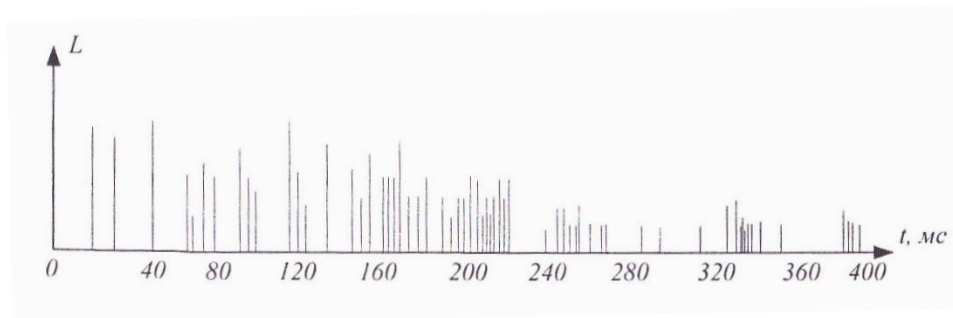


Рис. 1.11 Структура відбиттів [2, с. 126]

Перш за все неважко помітити, що в дану точку відбиття спочатку приходять дискретно, через відносно великі інтервали часу, а далі часовий спектр поступово ущільнюється. Інтервал Δt швидко зменшується з часом і структура переходить у суцільний спектр.

У припущенні експоненціального затухання звуку, рівень кожного наступного відбитого сигналу убиває в часі за лінійним законом.

Аналіз процесу затухання звуку показує, що у глядацькому залі великого об'єму порушується основне припущення, прийняте у висновках статистичної теорії. Навіть вважаючи втрати звукової енергії однаковими, бачимо, що процес затухання може різко відрізнитися від експоненціального.

На практиці, як правило, весь процес складається з двох нерівноцінних ділянок: короткої початкової, для якої поняття дифузності звукового поля втрачає зміст; і

завершальної, де густина часового спектру велика і, отже, можна користуватися усередненнями статистичної теорії.

Досліди показують, що структура ранніх відбиттів суттєво впливає на якість звучання як музики, так і мови. При цьому для мови і музики оптимізація звучання настає при різній структурі. Очевидно, цим можна пояснити різну якість звучання в двох глядацьких залах однакового об'єму при однаковому часі реверберації, але різної форми.

Таким чином, з наведеного аналізу ревербераційного процесу витікає, що затухання звуку не можна розглядати без урахування форми приміщення, що, в основному, впливає на початковий інтервал часу реверберації.

1.2. Звукоізоляція приміщення

Під терміном «звукоізоляція» розуміють захист приміщень від проникнення в них звукових завад або шумів.

Джерела шумів, як і самі шуми, можуть бути різноманітними. Шуми бувають тривалими широкополосними, тривалими з певним частотним спектром, короткочасними, шуми, що викликані зовнішніми механічними струсами елементів будівель, тощо. Вони можуть проникати у приміщення шляхом повітряного переносу, через товщі перегородок, виникаючи і поширюючись у твердих тілах.

Звукопроникненість перегородки заключається у відношенні енергії звукової хвилі, що пройшла через перегородку $E_{\text{пр}}$ до енергії звукової хвилі, що падає на неї $E_{\text{пад}}$. Оберенену величину називають звуконепроникненістю. Якщо ж звуконепроникненість виразити у дБ, ми отримаємо коефіцієнт власної звукоізоляції перегородки:

$$\sigma = 10 \lg \frac{E_{\text{пад}}}{E_{\text{пр}}} = L_{\text{пад}} - L_{\text{пр}}. \quad (1.24)$$

Для того, щоб розрахувати фактичний рівень шуму в приміщенні, користуються наступною формулою [4]:

$$L_{\phi} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^N S_i \cdot 10^{0.1(L_i - \sigma_i)} \right) - 10 \lg A, \quad (1.25)$$

де S_i – площі перегородок (або окремих їх ділянок), що відділяє i -те джерело шуму від приміщення; σ_i – власна звукоізоляція відповідних ділянок, L_i – рівень i -того джерела шуму; A – фонд поглинання у приміщенні. Значення L_i та σ_i є довідниковими.

Головна задача звукоізоляції приміщення – приведення фактичного рівня шуму до значення, менше за значення припустимого рівня шуму $L_{\text{п}}$, тобто має виконуватися нерівність $L_{\phi} < L_{\text{п}}$. Значення припустимого рівня шуму також є довідниковим та залежить від призначення приміщення. В табл. 1.1 наведені значення допустимого рівня шуму для основних типів приміщень [4].

Табл. 1.1

Припустимі рівні шумів для різних приміщень

Назва приміщення	Рівень шуму, дБ
Суспільні заклади	40
Лекційні зали	40
Театральні зали	30
Кінопроекційні апаратні	45
Глядацькі зали кінотеатрів	30-35
Ательє для запису музики	20-25
Ательє для запису мовлення	20-25
Апаратна звукозапису зі слуховим контролем	40
Велика і мала телестудії	30
Концертні радіомовні студії	25

1.3 Озвучування та звукопідсилення

З практики відомо – якщо приміщення має об'єм більше 2000 м³ або довжину більшу 20 м, то голосу людини, як правило, недостатньо для того, щоб створити достатній для забезпечення повної зрозумілості мови рівень гучності в віддалених точках цього приміщення. А якщо рівень шумів в приміщенні перебільшує 60 дБ, то

й у невеликих приміщеннях (об'ємом близько 200 м³) людського голосу недостатньо для повної зрозумілості мови. У таких випадках необхідно застосовувати звукопідсилюючу апаратуру, що складається з мікрофонів, підсилювачів та гучномовців [3, с.33].

Те ж саме можна сказати й по відношенню до сольних номерів та камерної музики. Для виконавців зі слабким голосом необхідно звукопідсилення в невеликих приміщеннях. Для великих оркестрів, що грають навіть у великих залах, звукопідсилення не потрібно. Але якщо оркестр невеликий, а необхідно створити враження більшого, то при відповідному звукопідсиленні цього можна досягти.

1.3.1. Вимоги до систем звукопідсилення приміщень.

При передачі мови основною задачею систем звукопідсилення є забезпечення потрібної розбірливості мови у всіх точках приміщення. Інакше розроблювана система не буде виконувати своє основне призначення.

Для виконання цієї вимоги необхідно, щоб тракт забезпечував відповідні перевищення спектральних рівнів мови над спектральним рівнем завад та шумів, а це залежить як і від загального рівня мови на місцях слухачів, так і від частотної характеристики апаратури.

Для музичних передач першою вимогою є створення відповідного рівня на місцях слухачів. В табл. 1.2 наведені рекомендовані номінальні рівні звукового поля [3].

Другою вимогою до будь-яких трактів передачі, найчастіше всього до останньої його ланки – приміщення, є оптимальність звучання та відсутність різних дефектів звучання у вигляді ехо, бубоніння через резонанси окремих невеликих об'ємів, різке збільшення часу реверберації через резонанси звукопоглинаючих матеріалів, тощо. По можливості ці дефекти мають бути усунені, а час реверберації та акустичне відношення повинні бути наближені до оптимальних для даного приміщення значень (табл. 1.2).

Для забезпечення вказаних вимог показники тракту (нерівномірність частотної характеристики; номінальний звуковий тиск, що розвивається гучномовцем;

направленість та чутливість гучномовців та мікрофонів; нелінійні спотворення; шуми і т.д.) повинні задовольняти відповідним нормам на ці показники.

Третьою вимогою до систем звукопідсилення та озвучування є якомога менша нерівномірність озвучування, тобто по можливості мінімальна зміна рівнів звучання від точки до точки. Величина нерівномірності визначається як різниця максимального L_{max} та мінімального L_{min} рівнів прямого звуку, що створюється системою озвучування:

$$\Delta L = L_{max} - L_{min}. \quad (1.26)$$

Варто враховувати те, що після забезпечення необхідного рівня L_{min} в найвіддаленіших точках приміщення, в ряді точок це значення може бути завищеним. Наслідком цього є непотрібна перенавантаження слуху, надмірна витрата потужності, неприємне відчуття слухача, при його переміщенні по приміщенню.

В табл. 1.2 наведені максимально допустимі значення нерівномірності озвучування.

Табл 1.2

Оптимальні значення параметрів звукового поля, дБ

Призначення установки	Номінальний рівень	Нерівномірність озвучування	Максимальне акустичне відношення
Відтворення музики та театральних ефектів	100	6	8 – 10
Відтворення музичних програм; підсилення солістів	94 – 96	6	8 – 10
Відтворення розважальних музичних програм (танці); музики та мови в шумних приміщеннях	94 – 96	8	4 – 6
Підсилення мови при низьких рівнях шуму	80 – 86	6	4 – 6
Створення музичного фону	60 – 70	8	8 – 10

1.3.2. Класифікація систем озвучування

Встановилась наступна класифікація систем озвучування приміщень та відкритих просторів: зосереджені, зональні, розподілені.

Зосереджені системи відрізняються тим, що містять один або декілька гучномовців, розташованих достатньо близько один до одного. До зосереджених систем з деяким допущенням можна віднести й такі системи, в яких гучномовці розташовані в одній частині приміщення.

В зосереджених системах направлення розповсюдження звуку може бути легко суміщено з направленням приходу глядацького відчуття, тобто легко виконати співпадіння глядацького та слухового образу. На рис. 1.12 зображені приклади розташування гучномовців у випадку зосереджених систем.

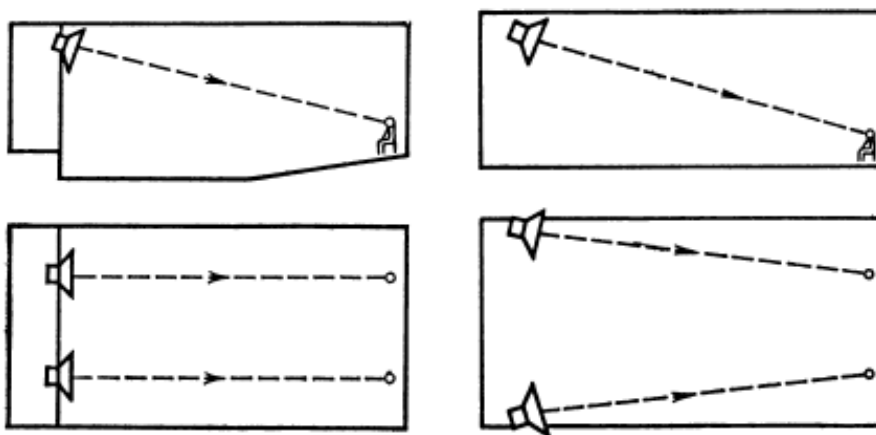


Рис. 1.12 Приклади розташування гучномовців на авансцені та коли розташувати їх на авансцені неможливо [3, с. 37]

В зональних системах озвучування гучномовці розташовують на таких відстанях один від одного, що рівень звуку в кожній з точок знаходження слухачів створюється в основному одним, найближчим, гучномовцем і лише на стиках зон рівні від сусідніх гучномовців сумуються (по інтенсивності). Це призводить до підвищення рівня на стиках зон, а відповідно й до зниження нерівномірності озвучування. В приміщеннях такі системи використовують лише у тих випадках, коли в ньому є частково ізольовані участки, наприклад ніші, або коли є інші приміщення, відділені від основного низькими або вузькими арками і т.п. Балкони також інколи можна розглядати як частково ізольовані приміщення.

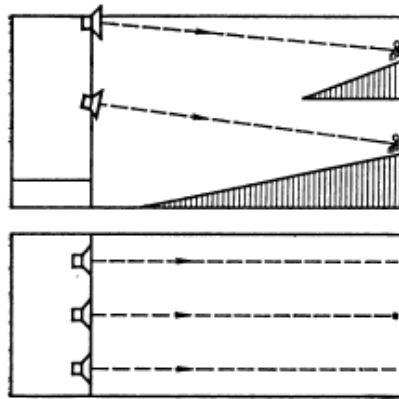


Рис. 1.13 Приклад розташування гучномовців при роздільному озвучуванні балкону та партеру [3, с. 37]

Розподілені системи представляють собою групу гучномовців, рознесених на невеликі відстані так, що в кожній точці приміщення сумарний рівень створюється від дії всіх або більшої частини гучномовців. Ряд гучномовців, розташованих так, що їх акустичні вісі направлені в одну сторону і перпендикулярні прямій, що з'єднують гучномовці, називають ланцюжком. Ланцюжки розташовують на одній стіні (рис. 1.14, а), на двох протилежних стінах (рис. 1.14, б), на стелі у вигляді одної або двох ланцюжків (рис. 1.15).

В розподілених системах слуховий та глядацький образи, як правило, не співпадають. Виключенням є одинарний ланцюжок, розташований на передній стіні, навіть якщо стіна доволі широка. До розподілених систем також відносять крісельні системи озвучування, коли на спинках кожного з крісел закріплені індивідуальні гучномовці, а рівень у слухача в основному створюється своїм та сусіднім гучномовцем.

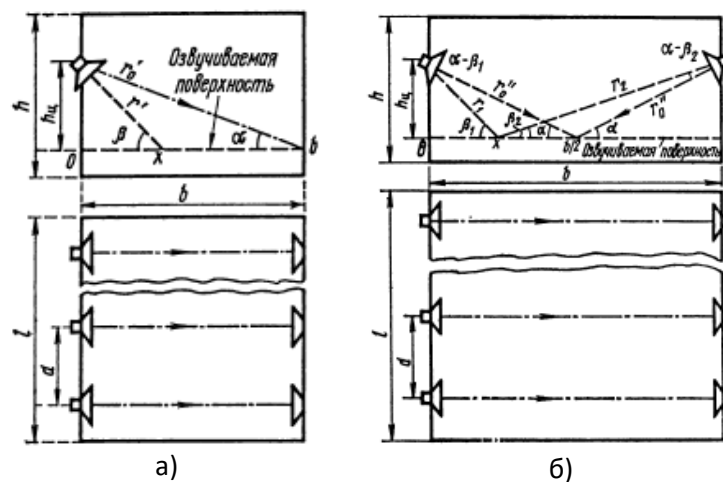


Рис. 1.14 Розподілені системи озвучування а) – з одним настінним ланцюжком; б) – з двома настінними ланцюжками [3, с. 37-38]

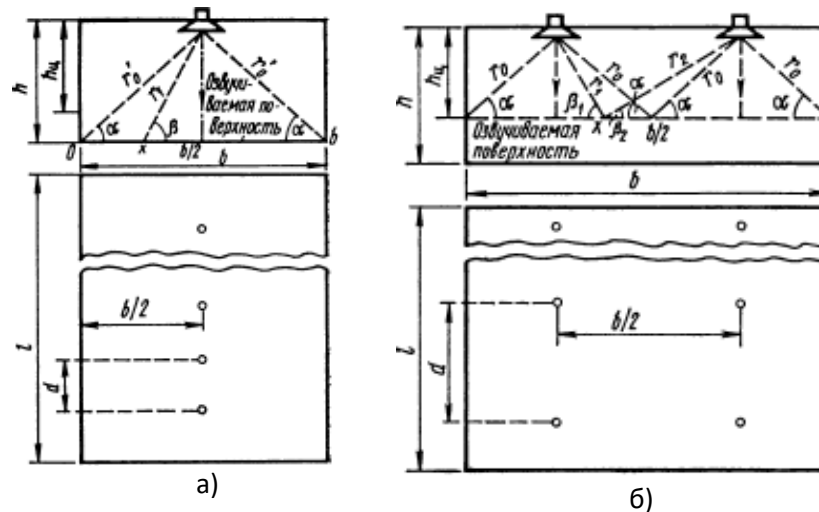


Рис. 1.15 Розподілені системи озвучування а) – з одним стельовим ланцюжком;
б) – з двома стельовими ланцюжками [3, с. 38-39]

Нарешті, в ряді випадків застосовують комбінацію систем озвучування, наприклад, зосереджену та зональну, зосереджену та розподілену.

1.3.3. Критерії якості звучання

Очевидно, що суб'єктивні параметри якості звучання мови (відсоток артикуляції) та музики (лункість, повнота звуку, теплота, яскравість, тощо) неможливо оцінити аналітично. Ці параметри визначаються суто суб'єктивною оцінкою слухачів.

Тому існують такі критерії якості звучання, які, на відміну від вищезгаданих, можливо визначити на етапі проектування або перепроєктування приміщення. Дані критерії базуються на понятті ранніх відбиттів. Відомо, що відбиття, які приходять до слухача через 50 мс після прямого сигналу сприяють підвищенню розбірливості мови. Для музичних програм корисною вважається енергія, що прийшла у перші 80 мс. На основі цих міркувань були введені такі критерії, як чіткість звучання (для мови) та ясність звучання (для музики).

Коефіцієнт чіткості звучання визначається як відношення густини акустичної енергії ранніх відбиттів до густини енергії повного ревербераційного сигналу:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}. \quad (1.27)$$

Оскільки набагато зручніше співставляти акустичні параметри, виражені в логарифмічних одиницях, був введений індекс чіткості:

$$C_{50} = 10 \lg \left(\frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right) = 10 \lg \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right). \quad (1.28)$$

Якщо $C_{50} > 0$ дБ (або $D_{50} > 0.5$), то складова розбірливості становить більше 90 % [5].

Прозорість звучання має той же сенс, що і чіткість звучання. Єдина відмінність полягає в тому, що розглядається проміжок часу у 80 мс:

$$C_{80} = 10 \lg \left(\frac{\int_0^{0.08} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right). \quad (1.29)$$

Вважають, що не існує одного оптимального значення параметру C_{80} . В даному випадку все залежить від смаку та вподобання слухачів [5].

Дані параметри є показником результату акустичного проекту. Вони є наслідком роботи з розрахунків акустичних характеристик приміщення після застосування звукопоглинаючих і звукоізолюючих матеріалів та після обрання системи озвучування. Тому ці критерії зазвичай розраховуються в останню чергу.

1.3.4. Основні тези проектування систем озвучування

Як вже зазначалось, основною характеристикою систем звукопідсилення та озвучення у випадку мовних програм є забезпечення ними зрозумілості мови. Для музичних передач вагоме значення має якість звучання.

Тим не менш, при виборі та проектуванні систем озвучення необхідно також враховувати економічні можливості та можливість технічної реалізації відповідних параметрів апаратури, а також вимоги техніки обслуговування.

На практиці при проектуванні системи озвучування або звукопідсилення відомі лише призначення даної системи, призначення приміщення, геометричні дані

приміщення, опис звукопоглинаючих матеріалів, кількість слухачів. Тому потрібно опиратися лише на ці дані. Але перед тим як приступити до проектування системи, необхідно визначити загальний рівень та форму спектру акустичних шумів в приміщенні.

Проектування системи озвучування в приміщеннях включає в себе вибір та розрахунок геометричних даних системи озвучування, вибір типу гучномовця, розрахунок створюваного ним звукового поля, розрахунок нерівномірності озвучування, розрахунок індексів тракту, вибір типу мікрофона, розрахунок рівня прямого звуку при передачі мови, розрахунок розбірливості мови та вибір апаратури звукопідсилення.

Різниця проектування систем озвучування для мовних приміщень, приміщень для музичних програм та багатоцільових приміщень полягає в різному підборі параметрів для даних систем. Також є відмінності і у виборі апаратури залежно від вимог високоякісної передачі музики, мови і т.п.

Висновки до розділу

В даному розділі були розглянуті основні тези архітектурної акустики та основ техніки звукопідсилення приміщення, які будуть використовуватися в подальших розрахунках.

В реальній ситуації, описані вище акустичні характеристики приміщення намагаються привести до оптимальних. Втім, в практичних випадках формули для розрахунку тих чи інших параметрів можуть бути видозміненими або взагалі відрізнитися від наведених вище. Тим не менш, суть залишається тою ж самою.

Після розрахунку звукопоглинаючих та звукоізолюючих матеріалів в рамках архітектурної складової акустичного проектування, цілком вірогідно, що одного людського голосу буде недостатньо для забезпечення сприйнятного рівня гучності в деяких точках приміщення. В таких випадках необхідне проектування системи озвучування приміщення.

В цьому розділі методика розрахунку систем озвучування та звукопідсилення була розглянута лише поверхнево. Більш детально вона буде розглянута в 3 розділі в рамках безпосереднього розрахунку.

РОЗДІЛ 2

АКУСТИЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАЛИ ВЧЕНОЇ РАДИ

2.1. Параметри приміщення зали Вченої Ради

Як вже зазначалось вище, акустичне проектування має на меті створення максимально прийнятних акустичних характеристик приміщення для створення в ньому комфортного акустичного середовища.

В алгоритм будь-якого акустичного проектування входять етапи вибору форми та розмірів приміщення, дослідження стандартного та розрахунок оптимального часу реверберації, розрахунок загального поглинання та вибір звукопоглинальних матеріалів, побудова площадок відбиттів, розрахунок часової послідовності відбиттів, розрахунок звукоізоляції приміщення та підбір звукоізоляційних матеріалів, звукоізоляція вентиляційних каналів (якщо такі мають місце).

Оскільки об'єкт даної роботи – уже існуюче приміщення, етап вибору форми та розмірів приміщення очевидно не передбачається. Також не передбачається звукоізоляція вентиляційних каналів у зв'язку з їх відсутністю.

Досліджуване приміщення є місцем засідання Вченої Ради Київського Політехнічного Інституту, на що вказує його назва. Оскільки в основному тут відбуваються мовні програми, зала Вченої Ради класифікується як мовне приміщення.

Форма приміщення має форму паралелепіпеда. Його розміри становлять 24 x 18.5 x 9 м. Об'єм – 4046 м³. Виходячи з цього, можна стверджувати, що дане приміщення потребує проектування системи звукопідсилення (с.20). Кількість сидячих місць становить 250 осіб, на одну особу припадає порядка 16 м³ об'єму приміщення. За санітарними нормами це цифра має становити 4.5 – 5 м³ [4, с.14].

На передній стіні знаходяться шість маленьких вікон, одна велика та дві довгі картини та двоє дверей. На відстані 2 м від стіни, на подіумі висотою 0.3 м знаходиться президія.

На лівій стіні розташовані 10 малих та 5 великих вікон.

На правій стіні знаходиться дві середніх картини та двері. Також тут розташовані два отвори (арки), що ведуть до невеликих коридорів та три отвори, за якими знаходиться балкон.

На задній стіні мають місце шість маленьких та три великих вікна та дві довгих картини.

Загальна картина оточуючих поверхонь у залі Вченої Ради виглядає наступним чином:

- стеля – поштукатурена та пофарбована, площа – 450 м^2 ;
- підлога – паркет, площа – 450 м^2 ;
- стіни мають гіпсову штукатурку, площа – $589,4 \text{ м}^2$;
- вікна – $99,4 \text{ м}^2$;
- двері – 13 м^2 ;
- картини – 14 м^2 ;
- стільці – напівм'які – 250 шт.

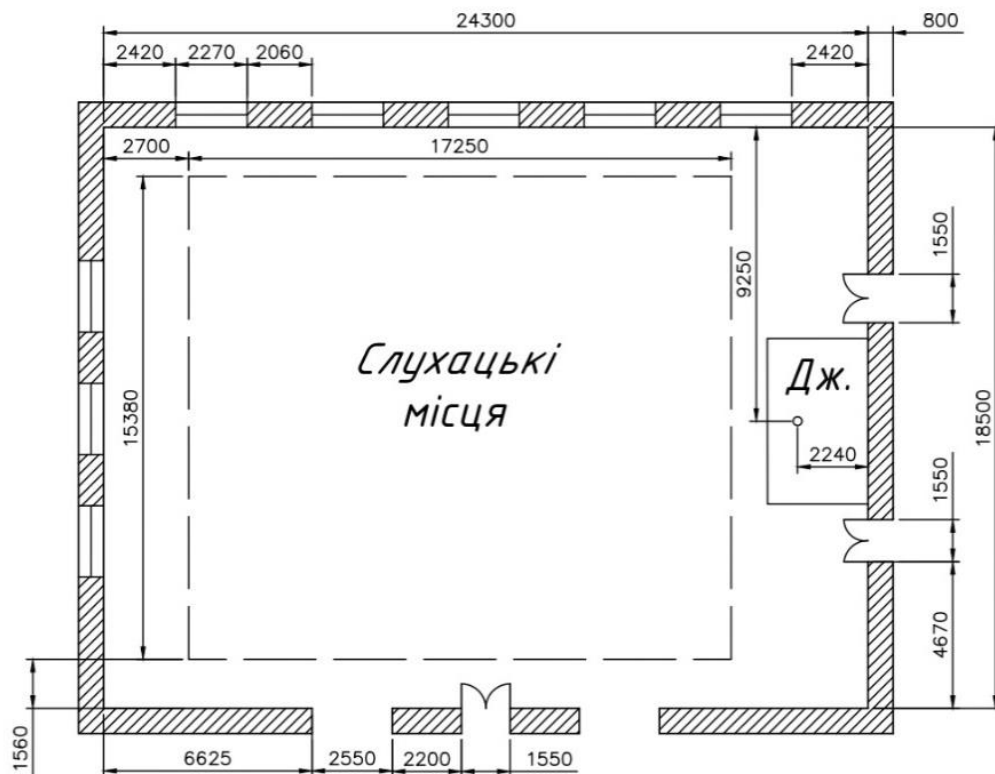


Рис. 2.1. План приміщення залу Вченої Ради

2.2. Визначення оптимуму реверберації

Для розрахунку оптимального часу реверберації використовується розраховується формулою Лівшеца для мовних приміщень [2, с.107]:

$$T_{opt} = 0.3 \lg V - 0.05 = 1.032 \text{ с.} \quad (2.1)$$

Визначення даного параметру актуальне лише для частоти 500 Гц. Для визначення оптимального часу реверберації на інших частотах використовують частотну характеристику T_{opt} за Кнудсеном [7]:

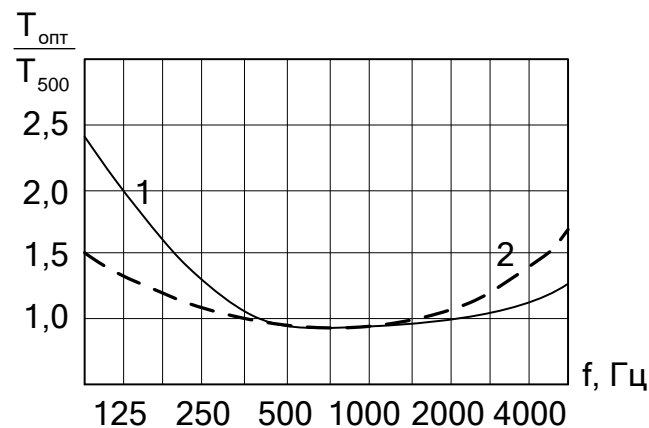


Рис. 2.2 Частотна характеристика оптимального часу реверберації за Кнудсеном [4, с.18]. 1 —музика; 2 – мова

Даний графік показує залежність відношення оптимуму реверберації до оптимуму реверберації на частоті 500 Гц від частоти. Потрібні значення оптимуму реверберації на необхідних частотах знаходяться з добутку відповідних значень з рис. 2.2 на час, знайдений з формули (2.1). Розраховані значення оптимального часу реверберації наведені в табл. 2.1.

2.3. Розрахунок загального поглинання

Розрахунок загального звукопоглинання починається з визначення потрібного фонду поглинання $A_{потр}$, який вимірюється в Себінах. $A_{потр}$ знаходиться зі співвідношення [4, с.20]:

$$A_{потр} = S_{\Sigma} \left\{ 1 - \exp \left[\frac{V}{S_{\Sigma}} \left(4\mu - \frac{0,164}{T} \right) \right] \right\}, \quad (2.2)$$

де μ — коефіцієнт затухання звуку в повітрі, який визначають за графіком, показаним на рис. 2.3; T — стандартний час реверберації. При цьому вологість повітря слід прийняти 60-70%. При цьому вологість повітря слід прийняти 60-70%.

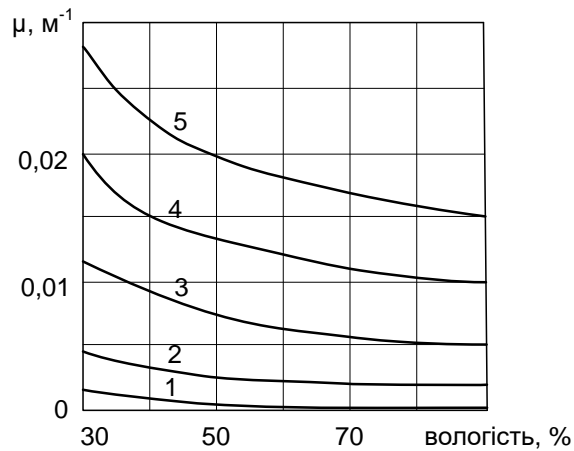


Рис. 2.3. Залежність коефіцієнту затухання звуку в повітрі від вологості [4, с.21]. 1 – 1024 Гц; 2 – 2048 Гц; 3 – 600 Гц; 5 – 8192 Гц.

Для частот нижче 2000 Гц затуханням звуку в повітрі можна знехтувати. Результат підбору вважається задовільним, якщо для вказаного раніше ряду частот розрахункове значення T відрізняється від оптимального не більше ніж на 10 %, тобто $0,9T_{opt} < T < 1,1T_{opt}$.

Вказанному відхиленню стандартного часу реверберації відповідає деяка область припустимих значень A_{min} і A_{max} . При підстановці в формулу для визначення A_{nom} значень $T_{max}=1,1T_{opt}$ і $T_{min}=0,9T_{opt}$ отримуються значення A_{min} і A_{max} для розрахункового ряду частот.

Табл. 2.1

Результати розрахунку необхідного звукопоглинання

Позначення одиниці	Частота, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
T_{opt}, c	1.393	1.084	1.032	1.032	1.084	1.444
$T_{min}=0,9T_{opt}, c$	1.254	0.975	0.929	0.929	0.975	1.301
$T_{max}=1,1T_{opt}, c$	1.533	1.192	1.135	1.135	1.192	1.589
$\alpha_{сер}=A_{потр}/S_{\Sigma}$	0.248	0.307	0.32	0.32	0.29	0.195

Продовження табл. 2.1

$A_{\text{потр}}, \text{Сєб}$	414.3	512.6	533.6	528.1	484.2	325.5
$A_{\text{min}}, \text{Сєб}$	381.3	473.3	493.1	484.4	444	291.5
$A_{\text{max}}, \text{Сєб}$	453.5	558.8	581.2	575.9	531.5	366

Загальний фонд поглинання можна умовно розділити на дві частини: основний фонд поглинання (ОФП) і додатковий (ДФП). До ОФП відносять звукопоглинання, що здійснюється предметами, людьми і поверхнями, які з необхідності повинні знаходитись в приміщенні в типовій для нього ситуації. До ДФП відносять поглинання додаткових спеціальних матеріалів і предметів, які розміщують для досягнення в ньому оптимальних акустичних умов.

У додатку А наведений основний та додатковий фонди поглинання. Тут також наведений брак поглинання, який в свою чергу компенсується спеціальними матеріалами, наведеними у ДФП.

У даному приміщенні для додаткового поглинання пропонується застосування звукопоглинаючих панелей з непресованого скловолокна Ecophon Focus Flexiform (рис. 2.4) на стелю та шпоновані деревоволокнисті плити Fantoni 4akustik 14/2 (рис. 2.5) на стіни.



Рис. 2.4. Ecophon Focus Flexiform



Рис. 2.5. Fantoni 4akustik 14/2

Вибір даних звукопоглинаючих матеріалів пояснюється гарними звукопоглинаючими властивостями. Панелі Ecorphon мають високі коефіцієнти поглинання звуку на усіх досліджуваних частотах. Тим не менш, як видно з табл. 2.1 на частоті 4 кГц фонд має бути дещо менший у порівнянні з іншими частотами. Тому, були вибрані плити Fantoni, які мають порівняно низький коефіцієнт звукопоглинання на частоті 4 кГц.

У виборі матеріалів також враховувалась й естетична складова. Дані моделі гарно вписуються в інтер'єр приміщення. Особливо це стосується плит Fantoni, які оздоблені шпоном натурального дерева.

При остаточному підрахунку загального поглинання, після застосування звукопоглинаючих матеріалів, бралось до уваги те, що ці матеріали закрили собою певну площу стелі та стіни. Одже від загального фонду віднімається звукопоглинання тих площ, які перекриваються внесеними матеріалами.

Після розрахунку загального поглинання з урахуванням звукопоглинаючих матеріалів, розрахуємо стандартний час реверберації, виразивши T з формули (2.2):

$$T = \frac{0.164V}{4\mu V - S_{\Sigma} \ln(1 - \frac{A}{S_{\Sigma}})} \quad (2.3)$$

Розраховані значення стандартного часу реверберації наведені в табл. 2.2.

Табл. 2.2

Стандартний час реверберації, с

125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц
1.562	1.147	0.977	1.081	1.082	1.206

2.4. Побудова площадок перших та других відбиттів

Побудова площадок відбиттів відбувалася опираючись на міркування, наведені у пунктах 1.1.7 та 1.1.8. Розглядалися площадки перших відбиттів від стелі, бокових стін, задньої стіни та площадки других відбиттів стеля – задня стіна, стеля – бокові стіни. Всі ілюстрації побудов наведені у додатку Б.

2.5. Розрахунок часової послідовності відбиттів

Основою для розрахунку часової послідовності відбиттів служать формули для визначення моменту приходу акустичних сигналів, що зазнають n відбиттів ($n=0,1,2,3,\dots$; при цьому $n=0$ відповідає прямому сигналу),

$$t_n = \frac{r_n}{c_0},$$

де c_0 – швидкість звуку.

В рамках даної роботи розрахунок виконується для дев'яти пар точок (випромінювач-приймач) і випромінювача ненаправленої дії. Точки обиралися таким чином, щоб охопити всю площу приміщення. Координати джерела – x, y, z ; координати приймача – x_0, y_0, z_0

$$r_0 = \left[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \text{довжина шляху прямого сигналу.}$$

Довжину шляху для кожного з наступних сигналів, що відбилися від поверхонь приміщення 1, 2 і більше разів:

$$r_n = \left[(x_n - x_0)^2 + (y_n - y_0)^2 + (z_n - z_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}},$$

Де x_n – координати уявного джерела (первинного або вторинного).

Рівень відбиття визначається формулою (1.23), в дБ.

Візуалізації структури відбиттів занесені до додатку В.

2.6. Розрахунок звукоізоляції приміщення

Суть звукоізоляції полягає в тому, щоб забезпечити припустимий рівень акустичних шумів, який для даного типу приміщень становить $L_{\text{п}} = 40$ дБ [4]. Для оцінки фактичного рівня шуму $L_{\text{ф}}$ у приміщенні будемо користуватись формулою (1.25).

Перш ніж приступити до розрахунків, визначимось із середовищами, що межують зі огороженнями приміщення, типами огорожень, їхніми значеннями власної звукоізоляції та занесемо отримані дані у табл. 2.3.

Усі стіни являють собою несучими цегляними конструкціями товщиною 80 см. Стеля та підлога є плоскими перекриттями по металевих балках. Ліва бокова та задня стіни межують з тихою вулицею. За передньої стіною знаходиться службове приміщення. Отвори у правій боковій стіні виводять у коридори, які у свою чергу межують з вестибюлем корпусу. За дверима у правій боковій стіні знаходиться службове приміщення. За іншою частиною правої бокової стіни (а саме за тими її частинами, що межують з передньою та задньою стінами) знаходиться внутрішній двір. Під приміщенням зали Вченої Ради знаходяться підвальні приміщення, а над стелею – горище.

Табл. 2.3

Звукоізоляція приміщення

Назва перегородки	Джерело шуму	Рівень джерела L_i , дБ	Площа перегородки S_i , м ²	Власна звукоізоляція σ , дБ		
				125 Гц	500 Гц	4000 Гц
Стіна	вулиця	70*	412	45	59	70
Стеля	горище	75	450	42	56	68
Підлога	підвальне приміщення	50	450	42	56	68
Вікна	вулиця	70	99	27	26	27
Двері	службове приміщення	70	13	14	16	20
Двері	вестибюль	80	8.4	14	16	20

В результаті розрахунків були отримані наступні значення:

- для 125 Гц рівень шуму $L_\phi = 50$ дБ;
- для 500 Гц рівень шуму $L_\phi = 47$ дБ;
- для 4 кГц рівень шуму $L_\phi = 45$ дБ.

Перевищення допустимого рівня шуму складає до 10 дБ. Це означає, що приміщення потребує певного покращення звукоізоляції. Для цього, наприклад,

поставити вікна з кращою звукоізоляцією. Як варіант можуть розглядатися вікна зі чотирма стулками, ущільнювачем та подвійним склопакетом.

Разом з тим, рекомендується замінити двері, що межують з вестибюлем на більш звукоізолюючі. Також можливо удосконалити вже існуючі двері шляхом обшивки або оббивки звукоізолюючими матеріалами (синтепон, поролон, вата) та закрити дерев'яною обшивкою з метою декорування.

Висновки до розділу

В даному розділі були розраховані акустичні характеристики приміщення та внесені пропозиції щодо їх покращення.

Як видно з розрахунків основного та необхідного фондів поглинання, наявні оточуючі поверхні приміщення абсолютно не забезпечують необхідне поглинання. Для досягнення оптимальних значень фонду та, відповідно, часу реверберації приміщення потребує встановлення додаткових поглинаючих матеріалів.

Також можна побачити, що на різних частотах прослідковується різна ситуація стосовно фонду поглинання. Так, наприклад, на частоті 4 кГц та 125 Гц значення необхідного додаткового фонду є меншим, ніж на інших частотах. Внаслідок цього, на частоті 4 кГц не вдалося досягти оптимального значення фонду поглинання.

Крім цього, приміщення зали Вченої Ради потребує кращої звукоізоляції. Найбільшими джерелами шуму є вулиця за вікнами та вестибюль за двома дверима. Тим не менш, встановлення звукоізолюючих матеріалів не необхідне, адже можна обійтися встановленням більш звукоізолюючих дверей та вікон.

РОЗДІЛ 3

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОЗВУЧУВАННЯ

3.1. Геометрія розміщення гучномовців

Розміри зали Вченої Ради вказують на те, що голосу людини буде недостатньо для того, щоб створити достатній рівень гучності у всіх точках даного приміщення. Це означає, що використання системи озвучування в даному випадку необхідне.

В даному приміщенні будемо використовувати розподілену систему озвучування. Ширина приміщення має достатньо великий розмір – 18.5 м. Отже в даному випадку рекомендується застосувати розподілену систему з двома настиінними ланцюжками [3, с.79]. Для озвучування слухацьких місць буде достатньо чотирьох гучномовців на одній стіні і чотирьох на іншій. Крок ланцюжка (відстань між гучномовцями у ланцюжку) $b_{\text{л}}$ буде дорівнювати 4.33 м. Висота підвісу гучномовців над озвучуваною поверхнею $h_{\text{л}}$ для розподіленої системи з двома ланцюжками можна визначити за наступною формулою [3, с.81]:

$$h_{\text{л}} = 0.5b_{\text{л}}\sqrt{1 - e_{\text{в}}^2}, \quad (3.1)$$

де $e_{\text{в}}$ – ексцентриситет діаграми спрямованості у вертикальній площині колонки.

Як видно з рівняння, висота підвісу гучномовців залежить від самого гучномовця та його діаграми спрямованості, а отже даний параметр ми визначимо після обрання типу гучномовця. Тоді ж визначимось і з остаточними координатами гучномовців. У горизонтальній площині розміщення гучномовців в приміщенні наведене на рис. 3.1.

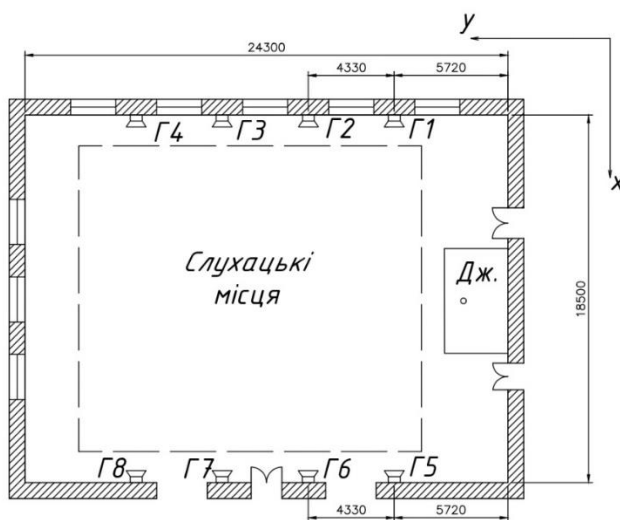


Рис. 3.1. Розміщення гучномовців у приміщенні

3.2. Вибір акустичної системи

Для озвучення даного приміщення обиралися інсталяційні колонні гучномовці. Даний тип гучномовців призначений для застосування у конференцзалах, лекційних аудиторіях, храмах, ресторанах та призначений в основному для проведення мовних програм. Основною перевагою даного типу гучномовців є невеликі розміри, естетичний вигляд та можливість кріплення на стіну.

Для застосування в залу Вченої Ради остаточний вибір обирався між моделями Park Audio VA 402i (рис. 3.2) та AMC COM SLIM 30 (3.3).



Рис. 3.2. Park Audio VA 402i



Рис. 3.3. AMC COM SLIM 30

Технічні характеристики даних моделей наведені на рис. 3.5 та рис. 3.6.

TECHNICAL DATA

Configuration and Acoustic Design

Full-range Loudspeaker, Sealed Box

Transducer

2 x 4" dia full range speaker

Specification

Power Handling (nom./ contin.)	60 / 120 W
Impedance	8 or 4 or 16 Ohms
Frequency Range	110 Hz – 17 kHz
Coverage	130°H x 100°V
Sensitivity	93 dB (1 W, 1 m)
Max. Output SPL:	
– continuous	111 dB / 1 m
– peak	117 dB / 1 m
Weight	2.9 kg
Dimensions	124 (W) x 325 (H) x 114 (D) mm

Рис. 3.4. Технічні характеристики Park Audio VA 402i

Technical Specifications	COM SLIM 30
Rated power	30 W
Transformer power taps	30 W - 15 W - 7,5 W - 8 Ω
Sensitivity	91 dB (1W/1m)
Maximum SPL	108 dB (Pmax / 1m) at 1995 Hz
Frequency response	180 Hz - 18 kHz
Dispersion at 1000 Hz	140° (H), 80° (V)
Protection	IP 55
Driver dimensions	4 x 2" (50 mm) woofer, 1 x 1" (25 mm) tweeter
Dimensions	405 mm x 75 mm x 69 mm
Weight	1,7 kg
Material	Aluminum
Colour	White (RAL 9016)
Additional accessory	MB1 wall mount brackets

Рис. 3.5. Технічні характеристики AMC COM SLIM 30

За технічними характеристиками ці моделі є доволі подібними. Значна відмінність між моделями є у потужності (VA 402i має вдвічі більшу потужність ніж його конкурент) та геометричних розмірах.

Безперечною перевагою Park Audio VA 402i є те, що компанія-виробник даної моделі – українська. Також її перевагою є більша потужність.

Модель AMC COM SLIM 30 ж має меншу на приблизно 25% вартість. Завдяки цій перевазі, а також тому, що дана модель має більш естетичний вигляд та не виглядає громіздкою, для озвучування зали Вченої Ради була обрана саме вона.

Для подальшого розрахунку знадобляться такі параметри обраного гучномовця, як рівень звуку, створюваний випромінювачем на відстані 1 м (SPL) (рис. 3.6) та діаграма спрямованості (рис. 3.7).

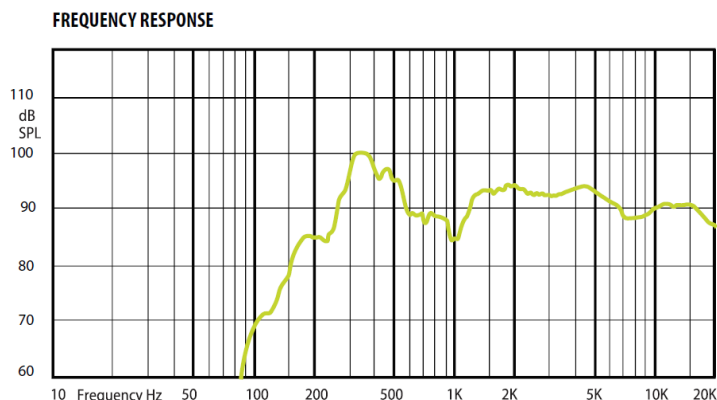


Рис. 3.6. Залежність SPL від частоти

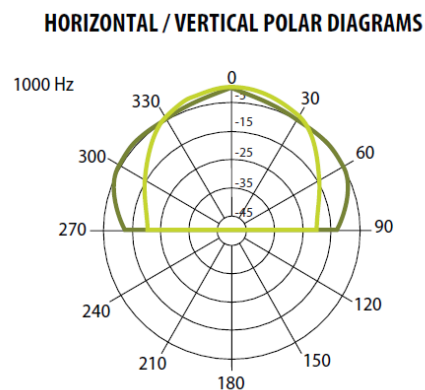


Рис. 3.7. Діаграма спрямованості на частоті 1000 Гц

Оскільки тип та модель колонок уже обрані, можна обрахувати висоту підвісу за формулою (3.1). Ексцентриситети діаграми спрямованості у вертикальній та горизонтальній площині визначаються:

$$e_{\Gamma} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2 \varphi_{0.5}}};$$

$$e_B = \frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2 \theta_{0.5}}}. \quad (3.2)$$

де $\varphi_{0.5}$, $\theta_{0.5}$ – кути розкриття на рівні 0.5 у горизонтальній та вертикальній площині.

Загалом, ексцентриситети потрібні для апроксимування характеристик спрямованості у вигляді еліпсоїда, оскільки для розрахунків звукового поля потрібні

аналітичні вирази для характеристики спрямованості. Однак, про це мове буде йтися дещо пізніше.

Взявши з технічних даних гучномовця кут $\theta_{0.5} = 80^\circ$, визначивши за формулою (3.2) ексцентриситет та підставивши в (3.1) ми отримаємо значення $h_{\text{л}} = 1.5$ м. При цьому кут нахилу колонок відносно вертикалі буде рівним $\theta = 11^\circ$.

Остаточні координати гучномовців будуть виглядати наступним чином:

Г1(5.72; 0; 2.5); Г2(10.05; 0; 2.5); Г3(14.38; 0; 2.5); Г4(18.71; 0; 2.5);

Г5(5.72; 18.5; 2.5); Г6(10.05; 18.5; 2.5); Г7(14.38; 18.5; 2.5); Г8(18.71; 18.5; 2.5).

3.3. Розрахунок звукового поля

Зала Вченої Ради є місцем проведення мовним програм. Згідно з табл. 1.1 [3], номінальний рівень звукового поля має бути на рівні 80 – 86 дБ. Водночас, нерівномірність озвучування має бути не більшою за 6 дБ, а акустичне відношення не повинне бути більшим за 4 – 6 дБ.

Як вже зазначалось вище, сумарне звукове поле містить в собі пряму $L_{\text{пр}}$ та дифузну $L_{\text{д}}$ складові. Визначається ж воно за наступною формулою:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg(10^{0.1L_{\text{пр}}} + 10^{0.1L_{\text{д}}}). \quad (3.3)$$

Пряма складова сумарного звукового поля визначається сумою рівнів кожного випромінювача:

$$L_{\text{пр}} = 10 \lg \sum_{i=1}^N 10^{0.1L_i}, \quad (3.4)$$

де L_i – рівень звуку, що створюється кожним i -м випромінювачем та визначається наступним чином:

$$L_i = \text{SPL} + 10 \lg \frac{D^2(\theta_{ik}, \varphi_{ik})}{r_{ik}^2}, \quad (3.5)$$

де SPL – рівень звуку, що створюється випромінювачем на відстані 1 м; r_{ik}^2 – відстань між акустичним центром i -го випромінювача та k -ою точкою спостереження.

Для подальших розрахунків звукового поля необхідно перейти до системи координат, яка б враховувала кути повороту в горизонтальній та вертикальній площині. Цей перехід буде виглядати наступним чином:

$$\begin{cases} u = [(X - x_i) \cos \varphi + (Y - y_i) \sin \varphi] \cos \theta - (Z - z_i) \sin \theta \\ v = -(X - x_i) \sin \varphi + (Y - y_i) \cos \varphi \\ w = [(X - x_i) \cos \varphi + (Y - y_i) \sin \varphi] \sin \theta + (Z - z_i) \cos \theta \end{cases}, \quad (3.6)$$

де (x_i, y_i, z_i) – координати випромінювача в декартовій системі координат; (X, Y, Z) – координати точок спостереження; φ, θ – кути повороту акустичної вісі випромінювача у горизонтальній та вертикальній площині відповідно.

Відстань між акустичним центром i -го випромінювача та k -ою точкою спостереження в новій системі координат:

$$r_{ik}^2 = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}. \quad (3.7)$$

Аналітичний вираз для характеристики спрямованості має наступний вигляд:

$$D(\varphi, \theta) = \frac{(1 - e_r^2) \cos \theta}{1 - e_r^2 \cos^2 \theta} \cdot \frac{(1 - e_b^2) \cos \varphi}{1 - e_b^2 \cos^2 \varphi} \quad (3.8)$$

Для розрахунку дифузного звукового поля будемо використовувати таку характеристику, як акустичне відношення. Визначимо акустичне відношення як відношення інтенсивності дифузної складової звукового поля $I_{\text{диф}}$ до інтенсивності прямої складової $I_{\text{пр}}$:

$$N = \frac{I_{\text{диф}}}{I_{\text{пр}}}.$$

Звідси виразимо інтенсивність дифузного поля:

$$I_{\text{диф}} = I_{\text{пр}} N. \quad (3.9)$$

У свою чергу інтенсивність прямої складової звукового поля:

$$I_{\text{пр}} = I_0 \cdot 10^{0.1 \cdot L_{\text{пр}}}, \quad (3.10)$$

де $I_0 = 10^{-12}$ Вт / м² – інтенсивність нульового рівня.

Акустичне відношення розраховується за наступною формулою:

$$N = \frac{16\pi r^2 (1 - \alpha_{\text{сер}})}{\alpha_{\text{сер}} S_{\Sigma} \Omega_{\text{в}} D_{\text{в}}^2(\varphi, \theta) \Omega_{\text{пр}} D_{\text{пр}}^2(\varphi, \theta)},$$

де r – відстань між джерелом звуку та приймачем; S_{Σ} – загальна площа огорожуючих поверхонь; $\Omega_{\text{в}}$, $\Omega_{\text{пр}}$ – коефіцієнти вісьової концентрації випромінювача та приймача відповідно; $D_{\text{в}}(\varphi, \theta)$, $D_{\text{пр}}(\varphi, \theta)$ – характеристики спрямованості випромінювача та приймача відповідно. Оскільки в якості приймача виступають слухачі, то їх коефіцієнт вісьової концентрації та характеристика спрямованості будуть дорівнювати 1. З урахуванням цього акустичне відношення буде дорівнювати:

$$N = \frac{16\pi r^2 (1 - \alpha_{\text{ср}})}{\alpha_{\text{ср}} S_{\Sigma} \Omega_{\text{в}} D_{\text{в}}^2(\varphi, \theta)}. \quad (3.11)$$

На рис. 3.8 зображена картина рівня звукового поля в приміщенні на частоті 1000 Гц, що створюється гучномовцями через 1.9 с після увімкнення.

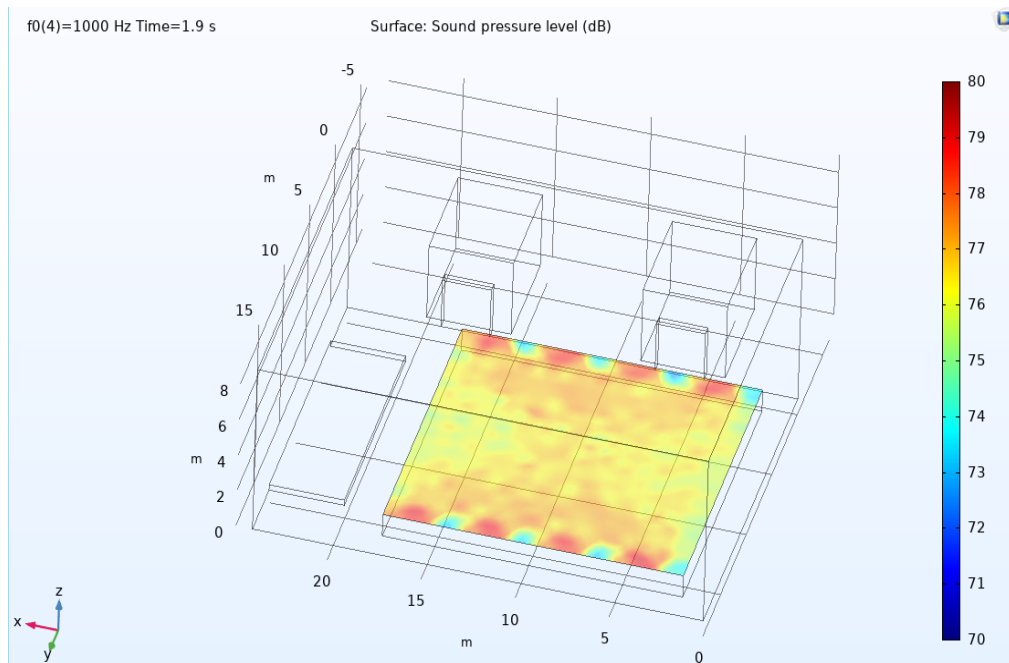


Рис. 3.8. Рівень звукового поля в приміщенні

3.4. Розрахунок критеріїв розбірливості

Для розрахунку критеріїв розбірливості, спершу, потрібно розрахувати еквівалентний час реверберації [1]:

$$T_{\text{екв}} = \frac{1}{\frac{1}{T} + \frac{1}{1.2} \lg \frac{1+N}{N}}, \quad (3.12)$$

де T – стандартний час реверберації в приміщенні.

Для розрахунку коефіцієнту чіткості D_{50} на практиці користуються наступною формулою:

$$D_{50} = 1 - e^{\frac{-0.69}{T_{\text{екв}}}}. \quad (3.13)$$

При визначенні індексу чіткості C_{50} використовують формулу (1.28).

Індекс прозорості на практиці визначається наступним чином:

$$C_{80} = 10 \lg(e^{\frac{1.1}{T_{\text{екв}}}} - 1). \quad (3.14)$$

Вищезгадані параметри розраховувалися для 9 точок приміщення (місцезнаходження точок наведено в додатку В) на частоті 1000 Гц. Результати розрахунків наведені в табл. 3.1.

Табл. 3.1

Критерії розбірливості

	T.1	T.2	T.3	T.4	T.5	T.6	T.7	T.8	T.9
$T_{\text{екв}}, \text{с}$	0.442	0.843	0.427	0.481	0.878	0.469	0.539	0.856	0.53
D_{50}	0.79	0.56	0.8	0.76	0.56	0.77	0.72	0.55	0.73
$C_{50}, \text{дБ}$	5.75	1.03	6.05	5.05	0.99	5.26	4.14	0.93	4.28
$C_{80}, \text{дБ}$	10.43	4.29	10.84	9.47	4.25	9.76	8.26	4.17	8.44

3.5. Підбір апаратури

Окрім гучномовців у приміщенні також передбачено використання підсилювача для гучномовців, два конденсаторні мікрофони типу «гусяча шия», один радіомікрофон та мікшерний пульта.

Підбираючи підсилювач для пасивних гучномовців, рекомендують обирати моделі одного й того ж виробника. Це пояснюється тим, що інженери намагаються найбільш точно підганяти параметри окремих пристроїв, що робить їх спільну роботу найбільш якісною.

Також, обов'язковою умовою є те, що підсилювач має бути двуканальним, оскільки два ланцюжки гучномовців на різних стінах під'єднуються до різних каналів підсилювача.

Беручи до уваги ці міркування, був обраний підсилювач АМС іА2х250 (рис. 3.9). Технічні характеристики даної моделі наведені на рис. 3.10.



Рис. 3.9. Підсилювач АМС іА2х250

Technical Specifications	iA2X250
Output power	2X250 W
AC power consumption	640 VA
Power supply	~ 220 V / 50 Hz
Stand by power consumption	65 VA
Outputs	Selectable output 4 Ω , 70 V or 100 V, Connectors - Screw terminal
Inputs	Sensitivity - 0 dBu, Impedance 10 k Ω , Connectors - Balanced XLR
Frequency response	20 Hz - 20 kHz
THD	0,1 %
Signal / noise ratio	95 dB
Controls	Power switch, input gain, input mode, output configuration, HP filter
Indicators	Signal, protection, output configuration
Cooling	Fan forced air
Dimensions	432 mm x 88 mm x 350 mm
Weight	7,4 kg

Рис. 3.10. Технічні характеристики

Процес вибору мікрофонів є набагато більш складним та довготривалим. Існує безліч виробників мікрофонної продукції, що пропонують найрізноманітніші моделі. Як було сказано раніше, для наших цілей необхідно обрати два мікрофони типу «гусяча шия» та один радіомікрофон.

При виборі радіомістем, бралися до уваги наступні вимоги:

- UHF діапазон;
- радіус дії 60 - 70 м;
- надійність;
- ціна.

В результаті до уваги були прикуті моделі Gemini UHF-116M (рис. 3.11), AMC iLive UX3 (рис. 3.12), Sennheiser XSW 35-B (рис. 3.13) та Samson SWC88HCL6E UHF Concert 88 w/Q6 (рис. 3.14).



Рис 3.11. Gemini UHF-116M



Рис. 3.12. AMC iLive UX3



Рис. 3.13. Sennheiser XSW 35-B



Рис. 3.14. Samson SWC88HCL6E UHF Concert 88 w/Q6

Усі вищезгадані моделі являють собою комплект передавача та динамічного мікрофона. Розглянемо їх переваги та недоліки.

Компанія Sennheiser славиться своєю надійністю, довговічністю та якістю. Великою перевагою є також велике відношення сигнал-шум. Тим не менш, завдяки цьому продукти цієї компанії є доволі дорогими у порівнянні з конкурентами. Не виняток й радіомікрофонна система XSW 35-B.

Моделі Samson SWC88HCL6E UHF Concert 88 w/Q6 та Gemini UHF-116M знаходяться приблизно в одній ціновій категорії. Основна різниця між ними полягає у радіусі дії (модель Samson має більший на 20 м радіус ніж Gemini). Основним

недоліком обох моделей є відсутність дисплею, що відповідно впливає на зручність їх користування.

Модель від компанії АМС має гарний показник ціна-якість, проте, як заявляють його виробники, даний мікрофон призначений більше для використання у школах та маленьких приміщеннях, аніж у великих залах. На це також вказує порівняно малий радіус дії мікрофону.

Тому остаточний вибір пав на модель Sennheiser XSW 35-B. На рис. 3.15– 3.17 наведені основні технічні характеристики його приймача та передавача мікрофону.

System	
Modulation	wideband FM
Frequency ranges	A: 548 to 572 MHz GB: 606 to 630 MHz B: 614 to 638 MHz C: 766 to 790 MHz D: 794 to 806 MHz E: 821 to 832 MHz and 863 to 865 MHz K: 925 to 937.5 MHz
Switching bandwidth	up to 24 MHz
Frequencies	adjustable in 25-kHz steps 8 frequency banks, each with up to 12 factory-preset channels
Signal-to-noise ratio	≥ 103 dBA
THD	≤ 0.9%
Temperature range	operation: 0°C to +40°C storage: -20°C to +70°C
Transmitter synchronization	2.4 GHz, Low Power OQPSK (only active during synchronization)

Receiver	
EM-XSW2	
Receiver principle	double superheterodyne
Diversity principle	True Diversity
Sensitivity (at peak deviation)	< 3 µV at 52 dB(A) _{rms} S/N
AF frequency response	50 to 16,000 Hz (-3 dB)
Max. AF output voltage (at peak deviation, 1 kHz AF)	1/4" (6.3 mm) jack socket (unbalanced): +6 dBu XLR socket (balanced): +12 dBu
Audio adjustment range	40 dB, adjustable via Jog dial
Power supply	12 V = nom. / 300 mA
Squelch	adjustable from 3 dBµV to 28 dBµV (combined with pilot tone)
Line/Mic level	20 dB, switchable
Housing material	rugged metal housing
Dimensions (W x H x D)	ca. 200 x 42 x 127 mm
Weight	ca. 680 g

Transmitters	
SKM-XSW e 835	
RF output power	10 mW
AF frequency response	80 to 16,000 Hz
Power supply	2 AA size batteries, 1.5 V
Operating time	approx. 10 hours
Microphone type	dynamic
Input sensitivity (capsule)	1.5 mV/Pa
Pick-up pattern	cardioid
Adjustment range of transmitter sensitivity	0 to -30 dB, adjustable in 10-dB steps
Housing material	rugged ABS housing
Dimensions	approx. 260 x 50 mm (L x Ø)
Weight	approx. 245 g

Рис. 3.15– 3.17. Технічні характеристики

Мікрофони типу «гусяча шия» широко представлені різними виробниками, проте в їх комплект зазвичай не входить настільний адаптер. Тому, під час проведення вибору мікрофонів даного типу в першу чергу зверталась увага на комплекти з настільного адаптеру та власне мікрофону.

Найоптимальнішим варіантом є вибір моделі AMC Page Station (рис. 3.18). Її технічні характеристики наведені на рис. 3.19.



Рис. 3.18. AMC Page Station

Technical Specifications	Page station
Capsule type	Condenser
Impedance	200 Ω
Sensitivity	-36 dB
Frequency	50 Hz–18 kHz
Connector	3-pin male XLR
Polar pattern	Supercardioid
Phantom power voltage	9 V - 50 V DC
Dimensions	355 mm (microphone length)
Weight	800 g
Material	Table stand - aluminum, goosneck - steel
Colour	Black

Рис. 3.19. Технічні характеристики

Вибір мікшерного пульта зупинився на Yamaha MG10XU (рис.20). На його користь грає те, що дана модель надзвичайно популярна та проста у використанні. Оскільки мікшер у залі Вченої Ради не виконує складних задач, а виступає в основному в ролі комутатора між мікрофонами та гучномовцями, від нього не вимагається наявність певних спеціальних можливостей.

Даний пульт має 10 каналів, чого цілком достатньо для поставлених задач. Також він обладнаний можливістю фантомного живлення, що дає змогу під'єднувати конденсаторні мікрофони.



Рис. 3.20. Yamaha MG10XU

Frequency Response	Input to STEREO OUT	+0.5 dB/-1.0 dB (20 Hz to 48 kHz), refer to the nominal output level @1 kHz, GAIN knob: Min
Total Harmonic Distortion (THD+N)	Input to STEREO OUT	0.02 % @ +14 dBu (20 Hz to 20 kHz), GAIN knob: Min 0.003 % @ +24 dBu (1 kHz), GAIN knob: Min
Hum&Noise *1 (20 Hz to 20 kHz)	Equivalent Input Noise	-128 dBu (Mono Input Channel, Rs: 150 Ω , GAIN knob: Max)
	Residual Output Noise	-102 dBu (STEREO OUT, STEREO LEVEL knob: Min)
Input Channels		10 channels: Mono [MIC/LINE]: 4, Stereo [LINE]: 3
Output Channels		STEREO OUT: 2, PHONES: 1, MONITOR OUT: 1, AUX (FX) SEND: 1
Input Channel Function	PAD	CH1 - CH4 26 dB
	HPF	CH1 - CH4 80 Hz, 12 dB/oct
	COMP	CH1 - CH2 1-knob compressor Threshold: +22 dBu to -8 dBu, Ratio:1:1 to 4:1, Output level: 0 dB to 7 dB, Attack time: approx. 25 msec, Release time: approx. 300 msec
	EQ	CH1 - CH9/10 HIGH: Gain: +15 dB/-15 dB, Frequency: 10 kHz shelving CH1 - CH4 MID: Gain: +15 dB/-15 dB, Frequency: 2.5 kHz peaking CH1 - CH9/10 LOW: Gain: +15 dB/-15 dB, Frequency: 100 Hz shelving
	PEAK LED	CH1 - CH4 LED turns on when post EQ signal reaches 3 dB below clipping (+17 dBu)
Level Meter	Post STEREO LEVEL Knob	2x7-segment LED meter [PEAK (+17), +10, +6, 0, -6, -10, -20 dB]
Internal Digital Effect (MG10XU)	SPX Algorithm	24 programs
Phantom Power Voltage		+48 V
Power Consumption		22.9 W
Dimensions (WxHxD)		244 mmx71 mmx294 mm (9.6" x 2.8" x 11.6")

Рис. 3.21. Технічні характеристики

Отже, як підсумок, загальний підбір апаратури буде виглядати наступним чином:

- гучномовці AMC COM SLIM 30 – 8 шт.;
- підсилювач AMC iA240X – 1 шт.;
- радіомікрофонна система XSW 35-B – 1 шт.;
- мікрофони типу «гусяча шия» AMC Page Station – 2 шт.;
- мікшерний пульт Yamaha MG10XU – 1 шт.

Комутація даних приладів буде наступною. Настільний адаптер, до якого під'єднаний мікрофон (або радіосистема) під'єднується до входу мікшерного пульта за допомогою XLR кабеля. До виходу мікшера XLR кабелем під'єднується підсилювач. Вихід підсилювач у свою чергу за допомогою клемних зажимів та провідників під'єднується до гучномовців.

Висновки до розділу

В даному розділі був розглянутий розрахунок системи озвучування, а також був проведений підбір необхідної апаратури.

При розрахунку рівня звукового поля у приміщенні було виявлено, що насправді він є дещо нижчий за оптимум, що пропонується у [3]. Тим не менш, були досягнуті достатні значення критеріїв розбірливості мови. Варто зазначити, що вищезгадані оптимуми рівня звукового поля у приміщенні є орієнтовними та не повинні обов'язково дорівнювати вказаним значенням. На це й вказує сам автор. Головна ж задача – досягти необхідної розбірливості мови.

При підборі апаратури головним критерієм виступала економічна сторона. Прилади підбиралися таким чином, щоб вони були водночас достатньо якісними, мали гарну ціну та забезпечували потреби приміщення.

ВИСНОВКИ

Акустичне проектування є дуже кропітким процесом та потребує достатньої уваги та зосередження.

При процесі акустичного проектування головною задачею інженера – проектувальника є забезпечення необхідної розбірливості мови (для мовних приміщень), досягання прийнятних суб'єктивних критеріїв оцінки приміщень для музичних програм (для музичних приміщень) або пошук певного компромісу (для багатоцільових приміщень).

Зала Вченої Ради є місцем проведення мовних програм, а отже в рамках цього проекту прагнулось забезпечення саме гарної розбірливості мови.

Для покращення акустичних характеристик в приміщенні необхідне встановлення додаткових звукопоглинаючих матеріалів, встановлення вікон та дверей з покращеною звукоізоляцією та застосування системи озвучування.

Варто зазначити, що зала Вченої Ради є історичним приміщенням. Відповідно в ній був відтворений аутентичний інтер'єр, який зі свого боку не забезпечує оптимальних акустичних характеристик. В свою чергу, встановлення звукопоглинаючих матеріалів може порушити естетику приміщення. У зв'язку з цим, при підборі матеріалів не в останню чергу розглядалося їх поєднання з уже існуючим інтер'єром.

Так само, естетична складова сягнула й підбір гучномовців. Вони не мають виділятися на фоні стін приміщення та привертати зайвої уваги. Але, звичайно, технічні характеристики гучномовців розглядалися у першу чергу. Проте для забезпечення необхідної чутності в залі Вченої Ради не потребується встановлення дуже потужних джерел звуку.

Вищезгадані оновлення зали Вченої Ради мають покращити акустичний комфорт приміщення. Таким чином, знаходження в даному приміщенні має доставити відвідувачу не лише естетичне задоволення, а й відмінні акустичні враження, що робить залу Вченої Ради ще більш особливою.

ДОДАТКИ

Додаток А

Основний фонд поглинання

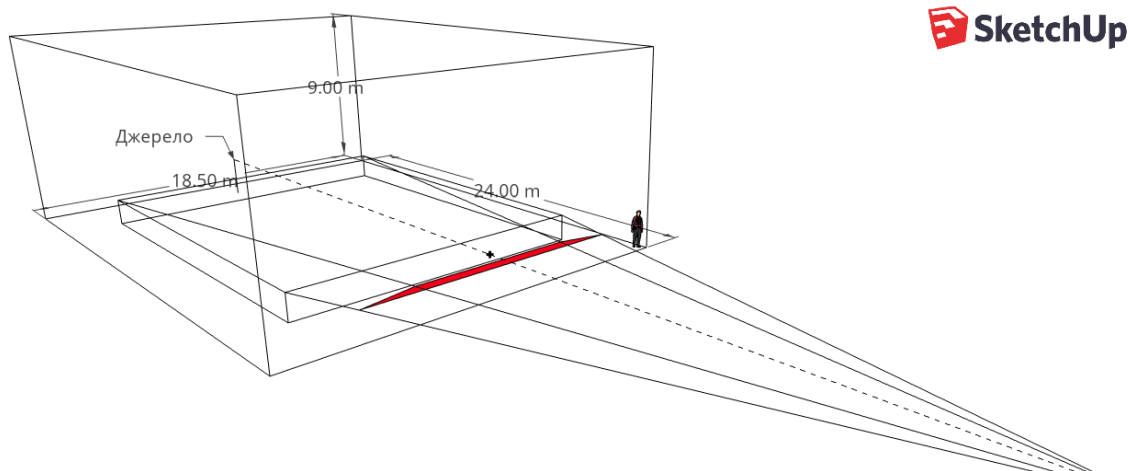
Загальна назва поглинача	Площа або кількість осіб	Коефіцієнти поглин. / фонди поглин. на розрах. частотах					
		125	250	500	1000	2000	4000
1. Стеля, штукатурка	450 м ²	0.02 / 9	0.02 / 9	0.02 / 9	0.03 / 13.5	0.04 / 18	0.04 / 18
2. Підлога, паркет на шпонках	425 м ²	0.2 / 85	0.15 / 63.8	0.12 / 51	0.1 / 42.5	0.08 / 34	0.07 / 29.8
3. Стіни, гіпсова штукатурка	594 м ²	0.04 / 23.8	0.04 / 23.8	0.04 / 23.8	0.06 / 35.6	0.06 / 35.6	0.03 / 17.8
4. Вікна, скло одинарне	99 м ²	0.35 / 34.7	0.25 / 24.8	0.18 / 17.8	0.12 / 11.9	0.07 / 6.9	0.04 / 4
5. Двері соснові	13 м ²	0.1 / 1.3	0.11 / 1.4	0.1 / 1.3	0.08 / 1	0.08 / 1	0.11 / 1.3
6. Картини, щити Бекеші	34 м ²	0.76 / 25.8	0.67 / 22.8	0.5 / 17	0.24 / 8.2	0.13 / 4.4	0.15 / 5.1
7. Стільці напівм'які	250	0.05 / 12.5	0.08 / 20	0.18 / 45	0.15 / 37.5	0.17 / 42.5	0.15 / 37.5
8. Меблі дерев'яні	25 м ²	0.12 / 3	0.11 / 2.8	0.1 / 2.5	0.03 / 0.8	0.08 / 2	0.11 / 2.8
Загальне поглинання:		204	177	176	160	154	125
Брак поглинання:		210	335	357	368	330	200

Додатковий фонд поглинання

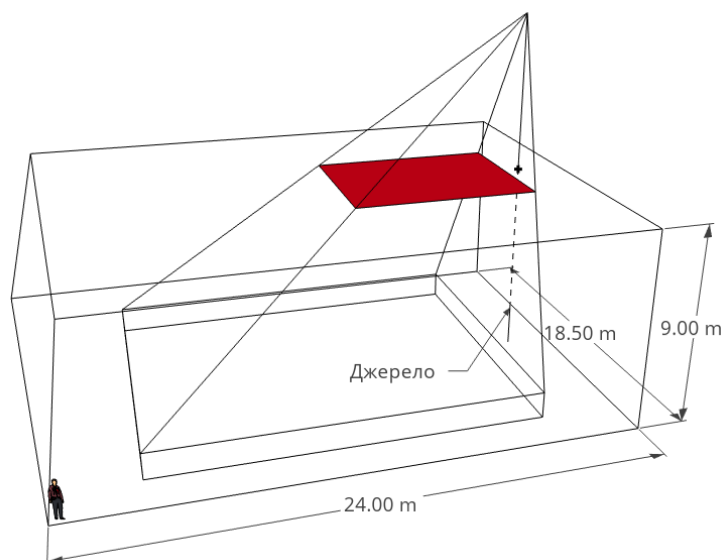
Ecophon Focus	300 м ²	0.55 / 165	0.9 / 270	1 / 300	0.9 / 270	0.95 / 285	0.8 / 240
Flexiform							
Fantoni 4akustik 14/2	100 м ²	0.15 / 15	0.5 / 50	0.9 / 90	0.92 / 92	0.64 / 64	0.46 / 46
Загальне поглинання		375	489	558	508	485	397

Додаток Б

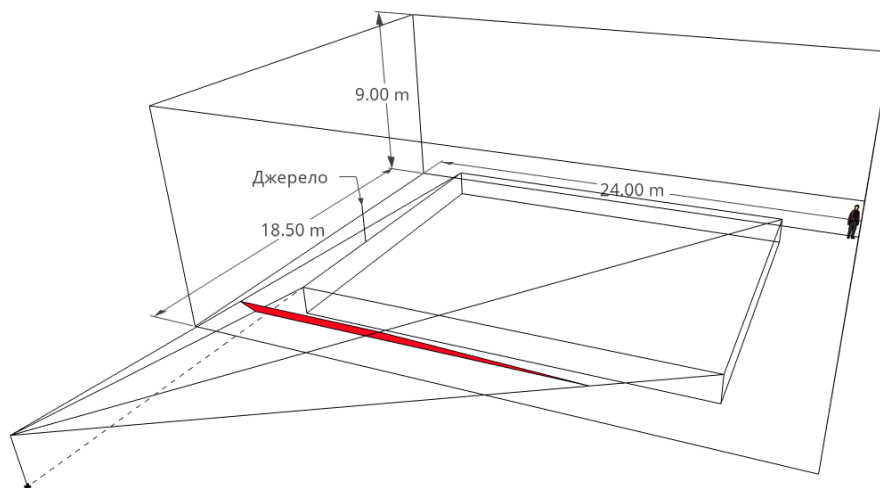
Площадки перших відбиттів



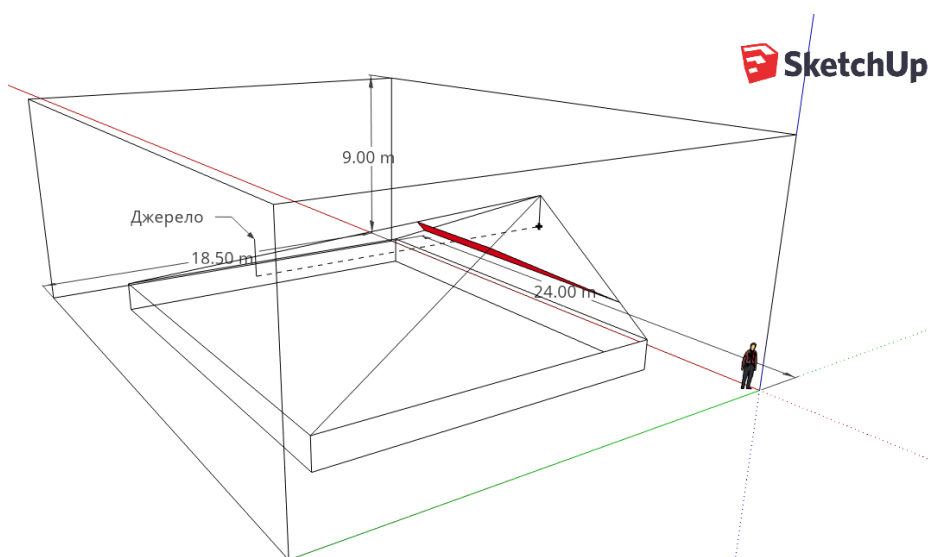
Площадка відбиттів від задньої стіни



Площадка відбиттів від стелі

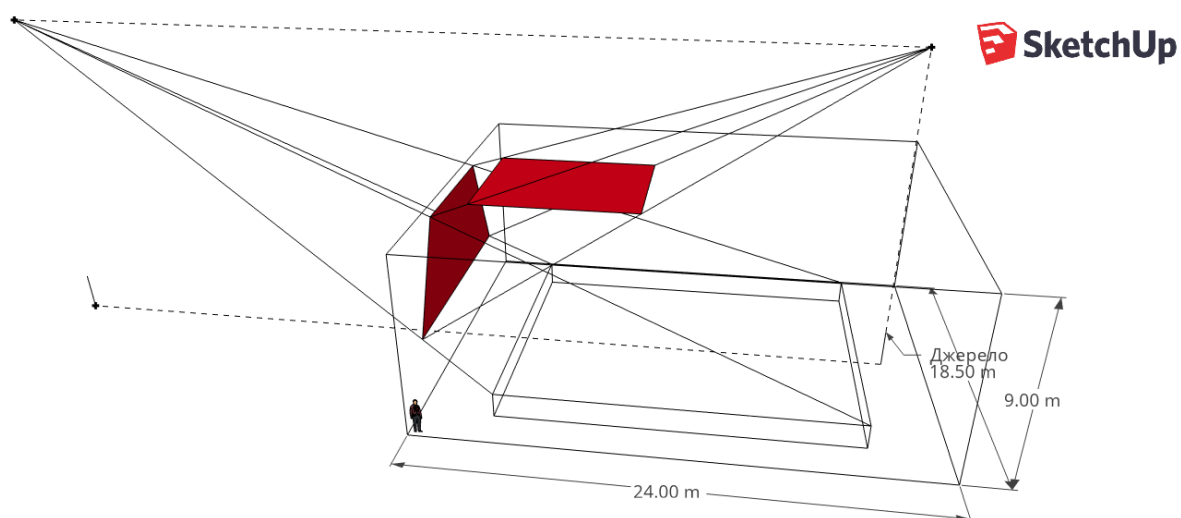


Площадка відбиттів від лівої стіни

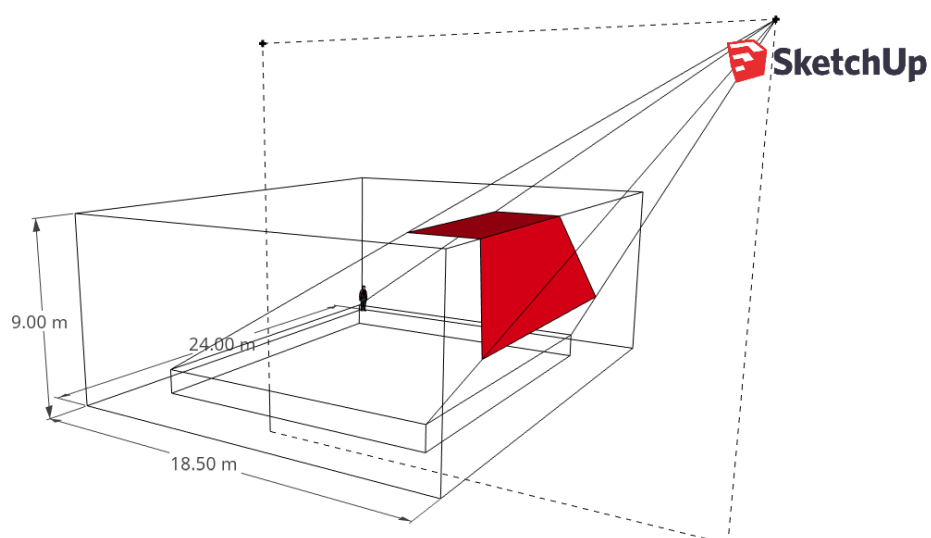


Площадка відбиттів від правої стіни

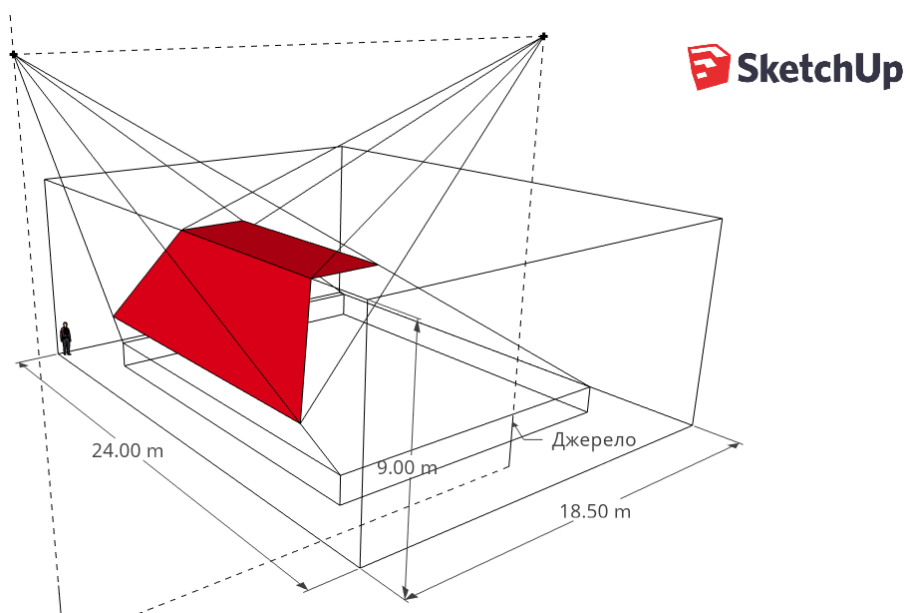
Площадки других відбиттів



Площадка відбиттів стеля – задня стіна



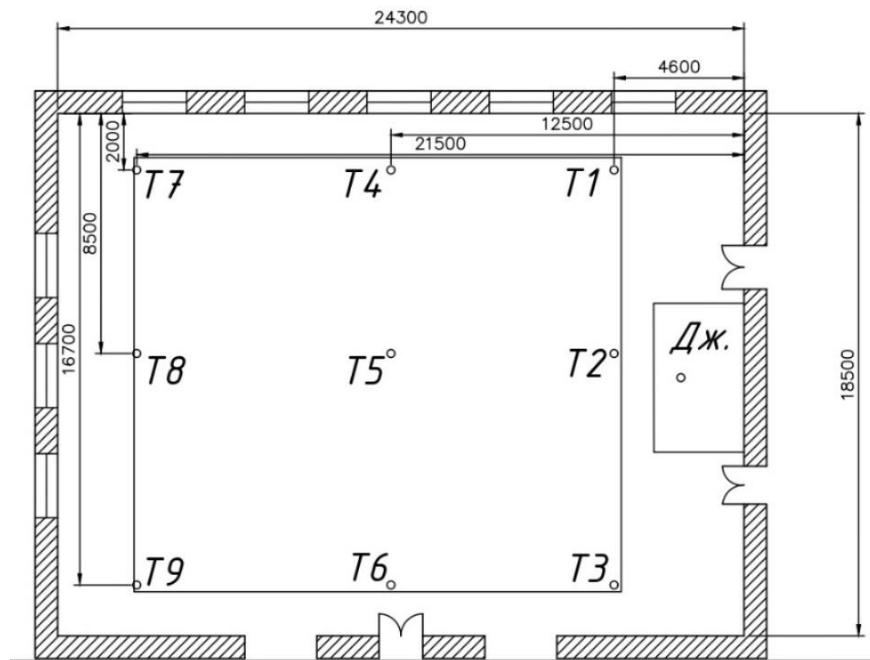
Площадка стеля – ліва стіна



Площадка стеія – права стіна

Додаток В

Структура відбиттів



Досліджувані точки

Таблиця часових затримок, t в мс

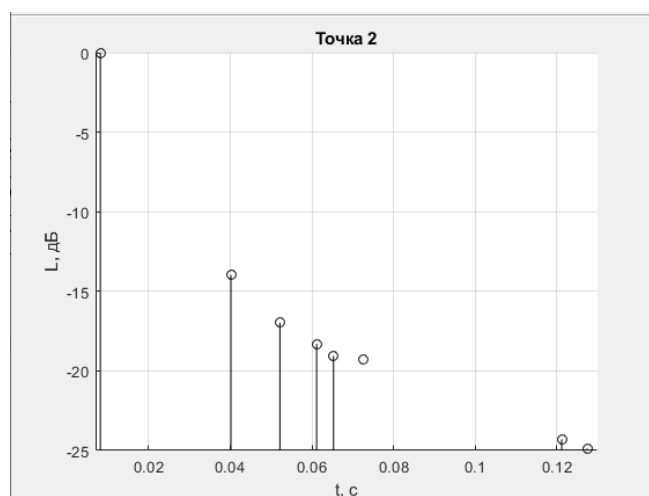
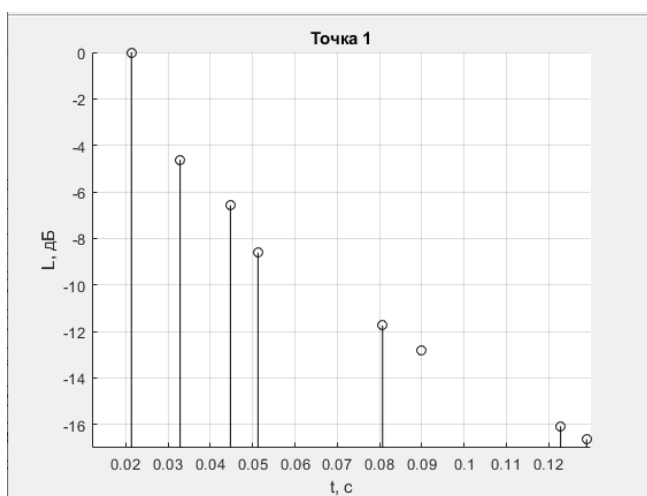
	Стеля	Ліва	Права	Задня	Ст.-зад.	Ст.-ліва	Ст.-пр.
T.1	23	12	59	102	108	30	69
T.2	32	44	53	113	119	57	65
T.3	21	51	11	98	104	60	28
T.4	17	8	49	62	69	22	58
T.5	19	29	37	65	73	40	47
T.6	16	42	8	60	67	51	22
T.7	14	5	37	10	20	16	45
T.8	12	19	26	11	21	29	34
T.9	11	33	5	10	20	40	15

Точка 1

№ п/п	Найменування сигналу	r_n , м	t_n , с	L_n , дБ
1	Прямий (дж.-сл.)	7	0.021	0
2	Дж.-стеля-сл.	14.7	0.044	-6.6
3	Дж.-лів.бок.ст.-сл.	10.8	0.032	-4.6
4	Дж.-пр.бок.ст.-сл.	26.6	0.08	-11.7
5	Дж.-задн.ст.-сл.	40.5	0.122	-16.1
6	Дж.-стеля-задн.ст.-сл.	42.6	0.13	-16.6
7	Дж.-стеля-лів.бок.ст.-сл.	16.9	0.051	-8.6
8	Дж.-стеля-пр.бок.ст.-сл.	29.6	0.09	12.8

Точка 2

№ п/п	Найменування сигналу	r_n , м	t_n , с	L_n , дБ
1	Прямий (дж.-сл.)	2.7	0.008	0
2	Дж.-стеля-сл.	13.3	0.04	-14
3	Дж.-лів.бок.ст.-сл.	17.2	0.052	-17
4	Дж.-пр.бок.ст.-сл.	20.2	0.061	-18
5	Дж.-задн.ст.-сл.	40	0.121	-24.3
6	Дж.-стеля-задн.ст.-сл.	42.1	0.128	-24.7
7	Дж.-стеля-лів.бок.ст.-сл.	21.6	0.065	-19
8	Дж.-стеля-пр.бок.ст.-сл.	24	0.071	-19.3

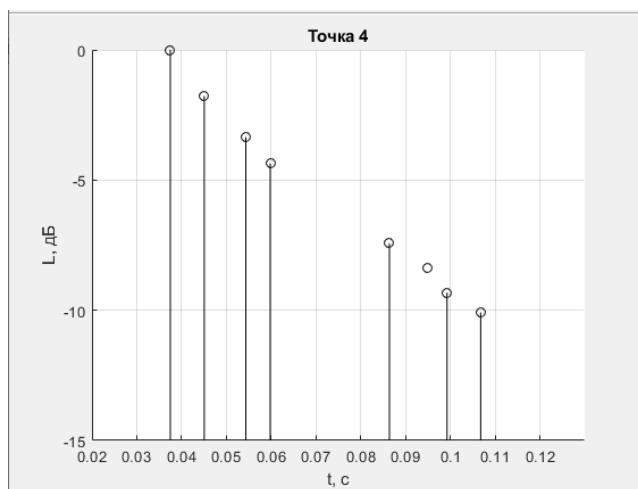
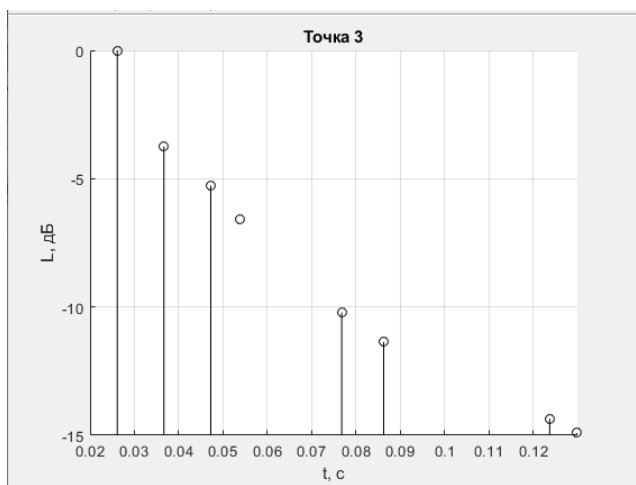


Точка 3

№ п/п	Найменування сигналу	r_n , м	t_n , с	L_n , дБ
1	Прямий (дж.-сл.)	8.6	0.026	0
2	Дж.-стеля-сл.	15.6	0.048	-5.3
3	Дж.-лів.бок.ст.-сл.	25.3	0.077	-10.2
4	Дж.-пр.бок.ст.-сл.	12.1	0.036	-3.7
5	Дж.-задн.ст.-сл.	40.8	0.122	-14.4
6	Дж.-стеля-задн.ст.-сл.	42.9	0.129	-14.9
7	Дж.-стеля-лів.бок.ст.-сл.	28.5	0.086	-11.7
8	Дж.-стеля-пр.бок.ст.-сл.	17.7	0.054	-6.6

Точка 4

№ п/п	Найменування сигналу	r_n , м	t_n , с	L_n , дБ
1	Прямий (дж.-сл.)	12.4	0.038	0
2	Дж.-стеля-сл.	17.9	0.054	-3.4
3	Дж.-лів.бок.ст.-сл.	14.9	0.045	-1.8
4	Дж.-пр.бок.ст.-сл.	28.5	0.086	-7.4
5	Дж.-задн.ст.-сл.	32.8	0.099	-9.3
6	Дж.-стеля-задн.ст.-сл.	35.2	0.107	-10.1
7	Дж.-стеля-лів.бок.ст.-сл.	19.7	0.06	-4.4
8	Дж.-стеля-пр.бок.ст.-сл.	31.3	0.095	-8.4

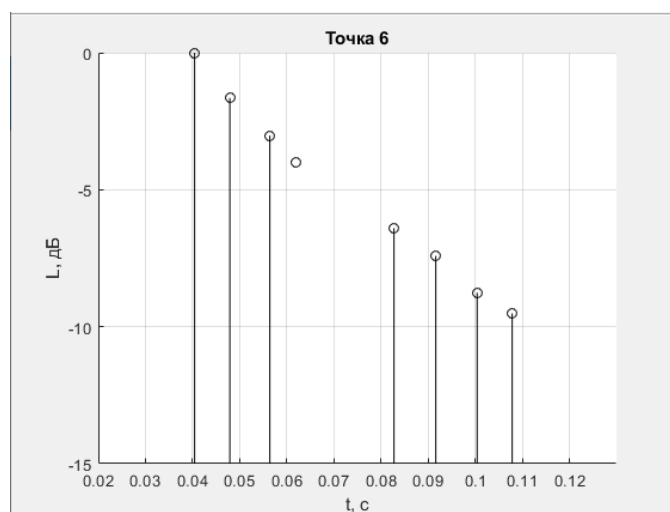
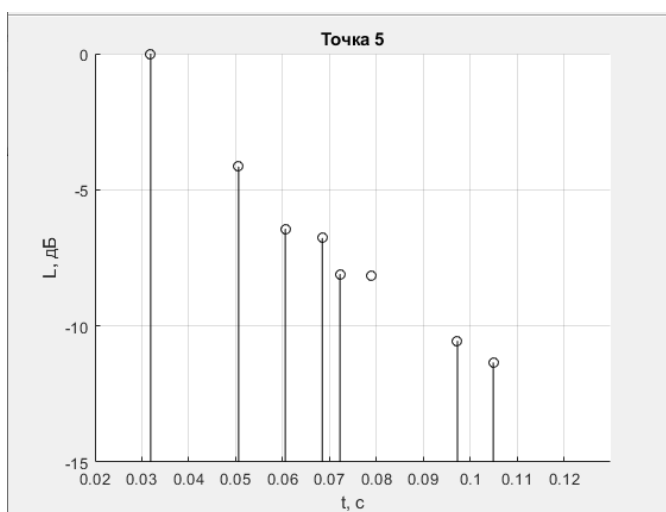


Точка 5

№ п/п	Найменування сигналу	r_n , м	t_n , с	L_n , дБ
1	Прямий (дж.-сл.)	10.5	0.032	0
2	Дж.-стеля-сл.	16.7	0.051	-4.2
3	Дж.-лів.бок.ст.-сл.	20	0.061	-6.4
4	Дж.-пр.бок.ст.-сл.	22.6	0.069	-6.8
5	Дж.-задн.ст.-сл.	32.1	0.097	-10.6
6	Дж.-стеля-задн.ст.-сл.	34.6	0.105	-11.3
7	Дж.-стеля-лів.бок.ст.-сл.	23.8	0.072	-8.1
8	Дж.-стеля-пр.бок.ст.-сл.	26.1	0.079	-8.1

Точка 6

№ п/п	Найменування сигналу	r_n , м	t_n , с	L_n , дБ
1	Прямий (дж.-сл.)	13.3	0.04	0
2	Дж.-стеля-сл.	18.6	0.056	-3
3	Дж.-лів.бок.ст.-сл.	27.3	0.082	-6.4
4	Дж.-пр.бок.ст.-сл.	15.8	0.048	-1.7
5	Дж.-задн.ст.-сл.	33.1	0.1	-8.8
6	Дж.-стеля-задн.ст.-сл.	35.6	0.108	-9.5
7	Дж.-стеля-лів.бок.ст.-сл.	30.2	0.092	-7.4
8	Дж.-стеля-пр.бок.ст.-сл.	20.5	0.062	-4

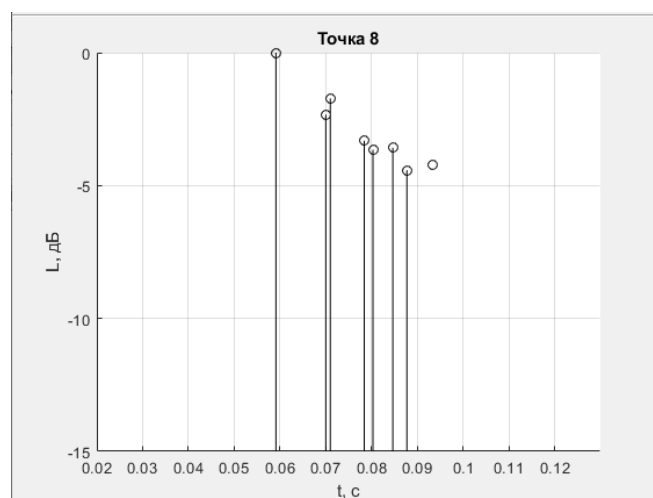
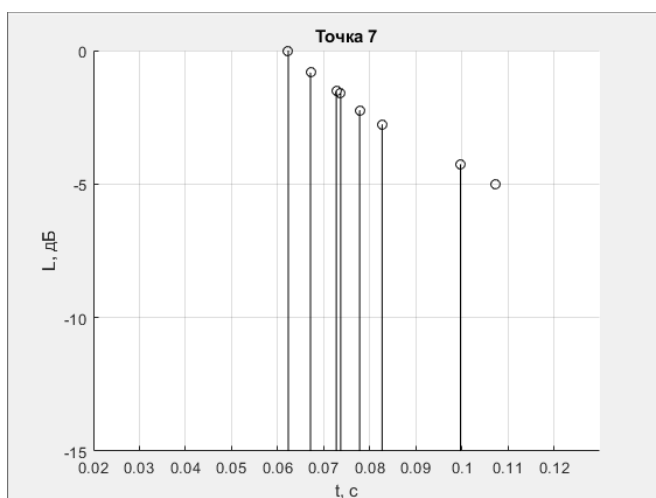


Точка 7

№ п/п	Найменування сигналу	r_n , м	t_n , с	L_n , дБ
1	Прямий (дж.-сл.)	20.6	0.062	0
2	Дж.-стеля-сл.	24.3	0.074	-1.6
3	Дж.-лів.бок.ст.-сл.	22.2	0.067	-0.8
4	Дж.-пр.бок.ст.-сл.	32.9	0.1	-4.3
5	Дж.-задн.ст.-сл.	24	0.073	-1.5
6	Дж.-стеля-задн.ст.-сл.	27.3	0.083	-2.8
7	Дж.-стеля-лів.бок.ст.-сл.	25.7	0.078	-2.2
8	Дж.-стеля-пр.бок.ст.-сл.	35.4	0.107	-5

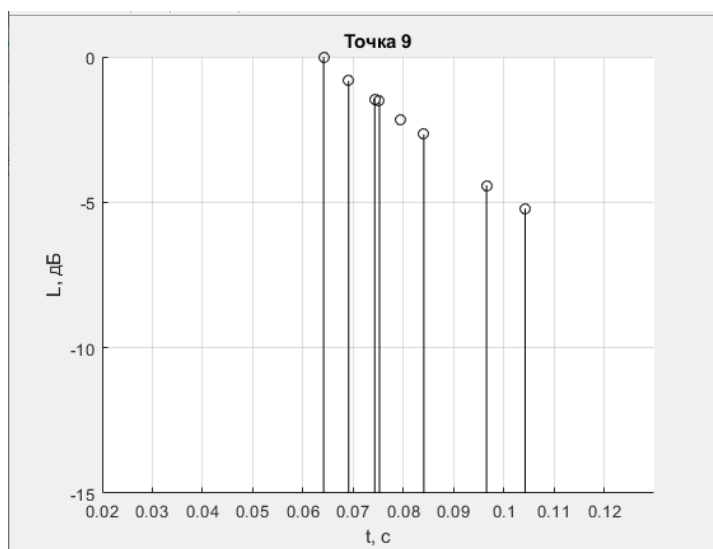
Точка 8

№ п/п	Найменування сигналу	r_n , м	t_n , с	L_n , дБ
1	Прямий (дж.-сл.)	19.5	0.059	0
2	Дж.-стеля-сл.	23.4	0.071	-1.7
3	Дж.-лів.бок.ст.-сл.	25.9	0.078	-3.3
4	Дж.-пр.бок.ст.-сл.	27.9	0.085	-3.6
5	Дж.-задн.ст.-сл.	23.1	0.07	-2.3
6	Дж.-стеля-задн.ст.-сл.	26.5	0.08	-3.7
7	Дж.-стеля-лів.бок.ст.-сл.	29	0.088	-4.4
8	Дж.-стеля-пр.бок.ст.-сл.	30.8	0.093	-4.2



Точка 9

№ п/п	Найменування сигналу	r_n , м	t_n , с	L_n , дБ
1	Прямий (дж-сл.)	21.1	0.064	0
2	Дж.-стеля-сл.	24.8	0.075	-1.5
3	Дж.-лів.бок.ст.-сл.	31.9	0.097	-4.4
4	Дж.-пр.бок.ст.-сл.	22.8	0.069	-0.8
5	Дж.-задн.ст.-сл.	24.5	0.074	-1.5
6	Дж.-стеля-задн.ст.-сл.	27.7	0.084	-2.7
7	Дж.-стеля-лів.бок.ст.-сл.	34.4	0.104	-5.2
8	Дж.-стеля-пр.бок.ст.-сл.	26.2	0.08	-2.2



СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Акустика: Справочник / Под ред. Сапожкова М.А. – Москва: Радио и связь, 1989. – 336 с.
2. Акустична техніка: навч. посіб.: у 15 т.:/ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», кафедра акустики та акустoeлектроніки; за заг. ред. В. С. Дідковського. – Київ: НМЦВО, 2000. Т.13: Архітектурна акустика: навч. посіб./ В. С. Дідковський, С. А. Луньова, О. В. Богданов; за заг. ред. В. С. Дідковського. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – 284 с.
3. Сапожков М.А. Звукофикация помещений: Проектирование и расчет. – Москва: Связь, 1979. – 144 с.
4. Луньова С.А., Заєць В.П., Богданов О.В. Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи “Акустичний проект приміщення” з курсу “Прикладна акустика”. Київ, НТУУ “КПІ”. 2015 р.
5. Анерт В., В. Рейхардт. Основы техники звукоусиления. – Москва: Радио и связь, 1984. – 320 с.
6. Фурдеев В.В. Электроакустика. Москва – Ленинград: ОГИЗ, Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1948 – 516 с.
7. Кнудсен В.О. Архитектурная акустика. – Харьков: ГНТИ Украины, 1936 – 525 с.
8. Ecophon Focus Flexiform A [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ecophon.com/ru/products/-----/Focus/Focus--Flexiform-A/>.
9. 4AKUSTIK - Wood panels from Fantoni | Architonic [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.architonic.com/en/product/fantoni-4akustik/1049671>.
10. VA402i | Park Audio [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://parkaudio.ua/en/speakers/install-series/va402i/>.
11. AMC Products [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.amcpro.eu/en/products>.

- 12.Sennheiser XSW2-835 Technical Data [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://assets.sennheiser.com/global-downloads/file/8937/XSW_2_Technical_Data_07_2017.pdf.
- 13.MG10XU/MG10 Technical Specifications [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://d1aeri3ty3izns.cloudfront.net/media/24/244347/download_244347.pdf.